精益工程视频讲堂（CAD/CAM/CAE）

FLUENT 12 流体分析及工程仿真

腾龙科技

朱红钧　林元华　谢龙汉　编著

清华大学出版社

北　京

PDG

VISIT…

LANZAROTE

Caliente.com

内 容 简 介

FLUENT 为通用的 CFD 软件包，是目前相对成熟且使用广泛的商用流体分析软件，可以模拟从不可压缩到高度可压缩范围内的复杂流动，其灵活的非结构化网格、基于解的自适应网格技术及成熟的物理模型，使它在转捩与湍流、传热与相变、化学反应与燃烧、多相流、旋转机械、动/变形网格、噪声、材料加工和燃料电池等方面有广泛应用。

本书以最新版本 FLUENT 12 为蓝本，主要介绍 FLUENT 12 的各个模型功能及操作步骤，包括 FLUENT 操作基础、前处理网格生成、湍流模型、非定常模型、传热模型、多相流模型、离散相模型、组分输运与化学反应模型、转动模型、用户自定义函数和图形后处理等，第 2～11 讲每讲均配有 3 个实例进行详细讲解。全书以"功能讲解+典型实例+全书视频讲解"的方式，通过大量的典型实例与重点知识相结合的方法全面介绍 FLUENT 12 的流动及传热分析功能与操作步骤。

本书可作为核工业、石油化工、机械制造、能源、管道集输、造船和水利等领域研究人员的参考书，也可作为 FLUENT 12 初学者入门和提高的学习宝典，还可作为各大中专院校教育、培训机构的专业 CFD 教材。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。
版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989　13701121933

图书在版编目（CIP）数据

FLUENT 12 流体分析及工程仿真/腾龙科技编著．—北京：清华大学出版社，2011.1
（精益工程视频讲堂（CAD/CAM/CAE））
ISBN 978-7-302-23772-3
Ⅰ．①F…　Ⅱ．①腾…　Ⅲ．①流体力学：工程力学-计算机仿真-应用软件，FLUENT 12
Ⅳ．①TB126-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 168845 号

责任编辑：许存权　朱　俊
封面设计：刘　超
版式设计：魏　远
责任校对：王　云
责任印制：杨　艳
出版发行：清华大学出版社　　地　　址：北京清华大学学研大厦 A 座
http://www.tup.com.cn　　邮　　编：100084
社 总 机：010-62770175　　邮　　购：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质 量 反 馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
印 装 者：北京国马印刷厂
经　　销：全国新华书店
开　　本：185×260　印　张：21.5　字　数：497 千字
（附 DVD 光盘 1 张）
版　　次：2011 年 1 月第 1 版　　印　　次：2011 年 1 月第 1 次印刷
印　　数：1～4000
定　　价：48.00 元

产品编号：039027-01

前　言

丰田汽车的“精益生产”精神造就了丰田汽车王国，也直接影响了日本的整个工业体系，包括笔者曾经工作过的本田汽车公司。精益生产的精髓是“精简”和“效率”，简单地说，只有拥有精简的组织结构，才能达到最大的生产效率。开发设计阶段是精益生产中的关键一环，产品设计开发是复杂、繁琐、反复的设计过程，只有合理组织设计过程，使用合理的设计方法，才能最大限度地提高设计开发效率。因此，将精益生产的理念运用于设计开发阶段有重要的现实意义。本丛书所提出的“精益工程”，包括精益设计（针对设计领域）、精益制造（针对数控加工领域）和精益分析（针对工程分析），其主要理念是“功能简洁必要，组织紧凑合理，学习高效方便”。众所周知，计算机辅助设计软件都包含繁杂的功能，有些功能只是针对某些特定用途，对于读者来说，并没有必要把这些繁杂功能全部掌握，如果把所有功能都堆积到书中，那么读者浪费的不仅仅是金钱，还有时间。

FLUENT 是目前国际上流行的商用 CFD 软件包，凡是与流体、热传递及化学反应等有关的领域均可使用其进行流体分析。它具有丰富的物理模型、先进的数值方法以及强大的前后处理功能，在航空航天、汽车设计、石油天然气和涡轮机设计等方面都有着广泛的应用。如其在石油天然气工业上的应用包括燃烧爆炸、井下分析、喷射控制、环境分析、油气消散/聚积、多相流动、管输流动、三相分离、钻井液流动和地下渗流等，基本覆盖了整个石油天然气工业的各个领域。本书从用户需求角度出发，针对各种复杂流动的物理现象，采用不同的离散格式和数值方法对相关知识点进行详细讲解，并以丰富的案例和全视频讲解等方式进行全方位教学。

本书的特色

本书中除第 1 讲外，各讲以“实例・模仿→功能讲解→实例・操作→实例・练习”为步骤，通过适量的典型实例操作和重点知识讲解相结合的方式，对 FLUENT 的各功能进行讲解。在讲解中力求紧扣操作、语言简洁、形象直观，避免冗长的解释说明，省略对不常用功能的讲解，使读者能够快速掌握 FLUENT 的使用方法和操作步骤。

本书将实例讲解、功能讲解和练习等内容，按照上课教学的形式录制多媒体视频，让读者如亲临教室，学习效果更好。读者甚至可以抛开书本，按照书中列出的视频路径，从光盘中打开相应的视频直接学习观看，这样学习起来会更轻松。视频包含语音讲解，可以用 Windows Media Player 等常用播放器进行观看。如果播放不了，可安装光盘中的 tscc.exe 插件。

本书内容

本书共分为 11 讲，依次介绍了 FLUENT 操作基础、前处理网格生成、湍流模型、非定常模型、传热模型、多相流模型、离散相模型、组分输运与化学反应模型、转动模型、用户自定义

函数和图形后处理等内容。

第 1 讲为 FLUENT 操作基础。介绍流体力学基本理论、计算流体力学的基本方程及 FLUENT 12、GAMBIT、Tecplot 的操作界面。

第 2 讲为前处理网格生成。介绍 GAMBIT 几何建模、网格划分、边界与介质类型定义的具体操作，并通过实例的讲解，帮助读者了解 GAMBIT 的操作步骤，掌握实际模型的建立与网格划分的方法。

第 3 讲为湍流模型。介绍几种常用的湍流模型方程，并通过 3 个实例介绍如何在 FLUENT 12 中进行湍流流动的模拟。

第 4 讲为非定常模型。介绍非定常模型的应用条件及设置方法，并通过一系列由浅入深的圆柱绕流问题的仿真模拟来介绍该模型的使用。

第 5 讲为传热模型。介绍传热的各种方法及其相应的应用领域，并通过 3 个实例的讲解帮助读者掌握传热分析的过程。

第 6 讲为多相流模型。介绍 FLUENT 12 中的多相流模型——VOF、Mixture 和 Euler 模型，并通过 3 个实例的讲解帮助读者掌握多相流动的模拟过程。

第 7 讲为离散相模型。针对离散相模型的计算模型、设置方法展开讲解，并通过 3 个实例阐述离散相模型的模拟过程。

第 8 讲为组分输运与化学反应模型。阐述组分输运与化学反应模型的设置方法和步骤，并列举 3 个实例帮助读者认识和掌握该模型的实际操作。

第 9 讲为转动模型。介绍 FLUENT 12 中用于模拟移动和变形区域的流体流动问题的动参考系模型、滑移网格模型及动网格模型，并通过 3 个实例的讲解帮助读者掌握转动模型的模拟过程。

第 10 讲为用户自定义函数。介绍 UDF 的基础知识，包括 UDF 宏及 UDF 的解释与编译，并通过 3 个实例的讲解帮助读者掌握 UDF 的基本用法及相关操作过程。

第 11 讲为图形后处理。介绍利用 FLUENT 及 Tecplot 进行模拟结果后处理的操作过程，并通过 3 个实例的讲解帮助读者熟悉两个软件的后处理功能。

本书读者对象

本书可作为理工科院校土木、建筑、水利、石油、储运、机械、自动化、过程装备等相关专业高年级本科生、研究生和教师的参考书，也可作为在科研院所、工业园、大型企业等从事核工业、石油化工、机械制造、能源、管道集输、造船、水利等领域学科研究及产品开发的工程技术人员从事 CFD 研究的参考书，还可作为 FLUENT 12 初学者入门和提高的学习宝典，以及各大中专院校教育、培训机构的专业 CFD 教材。

学习建议

建议读者按照图书编排的先后次序学习 FLUENT 软件。从第 2 讲开始，首先浏览“实例・模仿”，然后打开该案例的光盘视频仔细观看一遍视频，然后根据实例的操作步骤一步步在 FLUENT 中进行操作。如果遇到操作困难的地方，可以再次观看视频。对于功能讲解部分，可以先观看每一节的视频，然后动手进行操作。对于“实例・操作”部分，建议首先直接根据书

中的操作步骤动手进行操作，完成后再观看视频以加深印象，并解决自己动手操作中所遇到的问题。对于“实例・练习”部分，建议根据案例的要求自行练习，遇到不懂的地方再查看书中的操作步骤或观看操作动画。

感谢您选用本书进行学习，恳请您把对本书的意见和建议告诉我们，电子邮箱为swputicky@126.com或者xielonghan@yahoo.com.cn。

祝您学习愉快。

编　　者

2010年6月

目　录

第 1 讲　FLUENT 操作基础 1
1.1　CFD 基础 1
1.1.1　流体力学基本理论 2
1.1.2　CFD 基本方程 6
1.1.3　CFD 的发展 11
1.1.4　有限体积法基础 14
1.2　FLUENT 软件简介 18
1.2.1　FLUENT 的功能 19
1.2.2　FLUENT 的操作界面 21
1.2.3　FLUENT 的文件类型 26
1.2.4　FLUENT 与其他软件的数据交换 27
1.3　前处理简介 28
1.3.1　GAMBIT 的操作界面 28
1.3.2　网格生成方法 33
1.4　后处理简介 34
1.4.1　FLUENT 的后处理功能 35
1.4.2　Tecplot 界面及后处理功能 36
1.5　FLUENT 模型简介 37
1.5.1　湍流模型 38
1.5.2　非定常模型 39
1.5.3　传热模型 39
1.5.4　多相流模型 40
1.5.5　离散相模型 41
1.5.6　组分输运与化学反应模型 41
1.5.7　凝固与融化模型 42
1.5.8　动网格模型 43
第 2 讲　前处理网格生成 44
2.1　实例・模仿——二维偏心圆环 44
2.2　GAMBIT 几何建模 51
2.2.1　点 52
2.2.2　线 54
2.2.3　面 55
2.2.4　体 57
2.2.5　其他辅助操作 58
2.3　GAMBIT 网格划分 58
2.3.1　边界层 59
2.3.2　线 60
2.3.3　面 60
2.3.4　体 61
2.4　GAMBIT 边界与介质类型定义 62
2.4.1　边界定义 63
2.4.2　介质定义 64
2.5　实例・操作——三维圆柱体 65
2.6　实例・练习——三维同心环空柱体 73
第 3 讲　湍流模型 79
3.1　实例・模仿——90° 弯管内水的流动 79
3.2　湍流模型控制方程 87
3.2.1　S-A 模型 88
3.2.2　k-ε 模型 88
3.2.3　RSM 模型 91
3.2.4　LES 模型 92
3.3　湍流模型设置 92
3.4　实例・操作——偏心大小头渐扩管内油品流动 93
3.5　实例・练习——气体流经节流嘴的流动 101
第 4 讲　非定常模型 109
4.1　实例・模仿——单圆柱绕流 109
4.2　非定常流动 116
4.3　非定常模型设置 117
4.4　实例・操作——双圆柱绕流 118
4.5　实例・练习——柱群绕流 124
第 5 讲　传热模型 131
5.1　实例・模仿——偏心圆环内自然对流换热 131

5.2 传热方法概述 136
5.2.1 热传导 136
5.2.2 热对流 137
5.2.3 热辐射 138
5.3 传热模型的应用领域 140
5.4 传热模型的设置 141
5.5 实例·操作——冷热水混合器内部流动及换热 143
5.6 实例·练习——室内空调传热 149

第 6 讲 多相流模型 156
6.1 实例·模仿——T 型管内气固两相流 156
6.2 VOF 模型 164
6.3 Mixture 模型 165
6.4 Euler 模型 166
6.5 实例·操作——河流跌坎流动 167
6.6 实例·练习——上升管内气液两相流 173

第 7 讲 离散相模型 179
7.1 实例·模仿——液固两相流冲刷腐蚀 179
7.2 DPM 模型概述及应用 186
7.3 离散相轨道计算 187
7.4 传热与传质计算 188
7.5 喷雾模型 189
7.6 DPM 模型初始条件设置 190
7.7 DPM 模型边界条件设置 191
7.8 DPM 模型介质属性设置 192
7.9 实例·操作——气动喷砂流场 194
7.10 实例·练习——水力旋流器的颗粒分离 200

第 8 讲 组分输运与化学反应模型 207
8.1 实例·模仿——甲烷燃烧器模拟 207
8.2 组分输运与化学反应模型概述 215
8.3 组分输运与化学反应模型设置 217
8.4 实例·操作——输气管路泄漏扩散 220
8.5 实例·练习——液体燃料燃烧 226

第 9 讲 转动模型 235
9.1 实例·模仿——十字搅拌器周围液体流动 235
9.2 动参考系模型 241
9.3 滑移网格模型 242
9.4 动网格模型 243
9.5 实例·操作——活塞泵内流体流动 246
9.6 实例·练习——齿轮泵内流体流动 253

第 10 讲 用户自定义函数 260
10.1 实例·模仿——入口非匀速管流 260
10.2 FLUENT 的网格拓扑 265
10.3 UDF 基础 266
10.4 UDF 宏 267
10.4.1 访问 FLUENT 变量的预定义宏 267
10.4.2 实用工具宏 272
10.4.3 常用 DEFINE 宏 281
10.5 UDF 解释与编译 284
10.5.1 UDF 的解释 284
10.5.2 UDF 的编译 285
10.6 实例·操作——液体蒸发 286
10.7 实例·练习——物体受冲运动 294

第 11 讲 图形后处理 300
11.1 实例·模仿——90° 弯管水流的 FLUENT 后处理 300
11.2 FLUENT 12 后处理 306
11.2.1 Graphics and Animations 面板 307
11.2.2 Plots 面板 311
11.2.3 Reports 面板 313
11.3 Tecplot 后处理 316
11.3.1 FLUENT 数据的调入 316
11.3.2 Tecplot 绘图环境设置 318
11.3.3 Tecplot 的后处理功能 319
11.4 实例·操作——单圆柱绕流的 Tecplot 后处理 325
11.5 实例·练习——混合器内部流动的 Tecplot 后处理 329

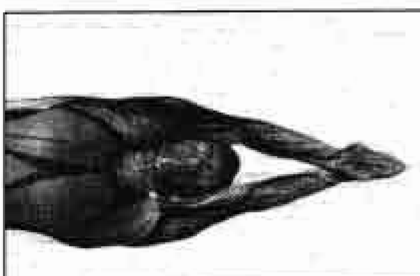
参考文献 334

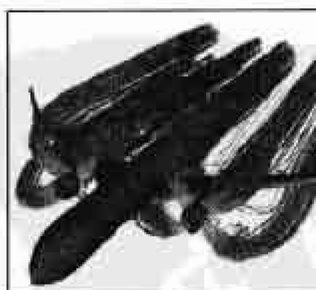
第 1 讲　FLUENT 操作基础

CFD 是基于离散化的数值计算方法，是利用计算机对流体相对于不同固体边界的内外流场进行数值模拟和分析的学科。随着计算机技术的高速发展，商用 CFD 软件逐渐兴起，FLUENT 是 CFD 软件中相对成熟和运用最为广泛的商业软件，因用户界面友好、算法健壮、新用户容易上手等优点，一直在用户中有着良好的口碑。长期以来，功能强大的模块、易用性和专业的技术支持等因素使得 FLUENT 受到企业的青睐，全球数以千计的公司得益于 FLUENT 这一工程设计与分析软件。它的不断完善与更新，使其不仅可以作为一个研究工具，而且还可以作为设计工具，在水利工程、土木工程、石油工程、天然气工程、环境工程、食品工程和海洋结构工程等领域发挥着巨大的作用。本章主要介绍 FLUENT 的最新版 FLUENT 12 的功能、操作界面及基本操作，使读者认识并了解 FLUENT。

本讲内容

- CFD 基础
- FLUENT 的功能
- FLUENT 与其他软件的数据交换
- FLUENT 的操作界面
- 前处理简介
- 后处理简介
- FLUENT 模型简介





1.1　CFD 基础

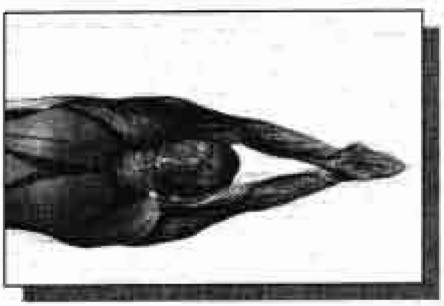
计算流体力学是计算流体动力学的简称，英文名为 Computational Fluid Dynamics（简称 CFD）。它是基于离散化的数值计算方法，是利用电子计算机对流体相对于不同固体边界的内外流场进行数值模拟和分析的学科，属于流体力学的一个分支。由于流体流动的复杂性，理论分析无法求得详细的解析解，计算流体力学正是为弥补此不足而于 20 世纪 60 年代发展起来的，并相应地形成了各种数值解法，主要包括有限差分法、有限元法和有限体积法。流体力学运动偏

第 1 讲　FLUENT 操作基础

CFD 是基于离散化的数值计算方法，是利用计算机对流体相对于不同固体边界的内外流场进行数值模拟和分析的学科。随着计算机技术的高速发展，商用 CFD 软件逐渐兴起，FLUENT 是 CFD 软件中相对成熟和运用最为广泛的商业软件，因用户界面友好、算法健壮、新用户容易上手等优点，一直在用户中有着良好的口碑。长期以来，功能强大的模块、易用性和专业的技术支持等因素使得 FLUENT 受到企业的青睐，全球数以千计的公司得益于 FLUENT 这一工程设计与分析软件。它的不断完善与更新，使其不仅可以作为一个研究工具，而且还可以作为设计工具，在水利工程、土木工程、石油工程、天然气工程、环境工程、食品工程和海洋结构工程等领域发挥着巨大的作用。本章主要介绍 FLUENT 的最新版 FLUENT 12 的功能、操作界面及基本操作，使读者认识并了解 FLUENT。

本讲内容

- CFD 基础
- FLUENT 的功能
- FLUENT 与其他软件的数据交换
- FLUENT 的操作界面
- 前处理简介
- 后处理简介
- FLUENT 模型简介





1.1　CFD 基础

计算流体力学是计算流体动力学的简称，英文名为 Computational Fluid Dynamics（简称 CFD）。它是基于离散化的数值计算方法，是利用电子计算机对流体相对于不同固体边界的内外流场进行数值模拟和分析的学科，属于流体力学的一个分支。由于流体流动的复杂性，理论分析无法求得详细的解析解，计算流体力学正是为弥补此不足而于 20 世纪 60 年代发展起来的，并相应地形成了各种数值解法，主要包括有限差分法、有限元法和有限体积法。流体力学运动偏

微分方程有椭圆型、抛物型、双曲型和混合型之分，计算流体力学很大程度上就是针对不同性质的偏微分方程采用并发展了相应的数值解法。

1.1.1 流体力学基本理论

流体是指在任何微小切应力作用下都会发生连续不断变形的物质，我们把这种连续不断的变形称为流动，即流体不能在承受剪切力的同时，使自己保持静止状态。

流体与固体的区别在于，当施加一定外力时，固体也要发生变形，但变形量达到一定程度时，其内部的变形抗力就会阻止固体继续变形，因此，固体能承受压力、拉力和切力，不呈现流动性。

流体力学就是以流体为研究对象，研究其平衡、运动时宏观物理量的变化规律，及流体与固体之间相互作用的力学特点的一门学科。计算流体力学则主要利用数值计算方法来完成流体力学的研究任务，属于流体力学的分支。在利用计算流体力学方法进行流体流动的数值仿真之前，应首先了解流体力学相关的基本理论。

1. 流体质点与连续介质模型

流体由分子组成，分子之间有间距、不连续。由于我们研究的是平衡、运动时流体宏观物理量的变化规律及流体与固体之间的相互作用力，若通过研究分子运动来研究流体的运动是极其复杂且没有必要的。因此，流体力学研究的最小单元不是分子，而是具有确定统计平均特性且体积很小的流体微团，称为流体质点，它具有宏观小、微观大的性质。

连续介质模型是将流体视为没有空隙的由流体质点充满它所占据的整个空间的一种连续介质，且其所有的物理量都是空间坐标和时间的连续函数的一种假设模型，这样就可以引用连续函数的解析方法来研究流体平衡和运动状态下有关物理参数之间的数量关系。

提示：当所研究的工程实际尺寸与分子的自由行程为相同或相近的数量级时，就不能应用连续介质模型，如稀薄气体。

2. 流体的物理性质

流体具有惯性、压缩性、膨胀性、粘性和表面张力特性等物理性质，其中粘性是其区别于固体的最主要的物理性质。

（1）惯性

惯性是物质保持原有运动状态的特性，即使流体在不受外力作用时，也具有保持原有运动状态的属性。质量是流体惯性大小的量度，质量越大，惯性越大。而表示质量大小的物理参数是密度ρ，其表达式如下：

$$\rho = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \tag{1-1}$$

式中：ρ为流体密度，kg/m^3；m为流体质量，kg；V为流体体积，m^3。

（2）压缩性

流体的压缩性是指温度不变时，流体体积和密度随所受压强的变化而变化的性质。度量压缩性大小的物理参数为体积压缩率，其表达式如下：

$$\beta=-\frac{\mathrm{d}V/V}{\mathrm{d}p} \tag{1-2}$$

式中：β 为体积压缩率，Pa^{-1}；p 为所受的外部压强，Pa。

（3）膨胀性

流体的膨胀性为压强不变时，体积随温度而变化的性质。用温度变化 1K 时体积的相对变化来表示膨胀性的大小，称为体胀系数，表达式为：

$$\alpha_v=\frac{\mathrm{d}V/V}{\mathrm{d}T} \tag{1-3}$$

式中：α_v 为体胀系数，K^{-1}；T 为流体温度，K。

（4）粘性

粘性是流体运动状态下具有抵抗剪切变形的能力。当流体微团发生相对运动时产生切向阻力，其产生原因主要为流体分子间的引力以及固体边壁对流体分子的吸附力和流层间分子的动量交换。此切向阻力又称为切应力，其大小可由牛顿内摩擦定律计算得出：

$$\tau=\mu\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} \tag{1-4}$$

式中：τ 为切应力，Pa；μ 为流体动力粘度，Pa·s；$\mathrm{d}u/\mathrm{d}y$ 为速度梯度，s^{-1}。

表示流体粘性的物理量有动力粘度 μ 与运动粘度 υ 两种，分别表示为 $\mu=\tau/(\mathrm{d}u/\mathrm{d}y)$ 和 $\upsilon=\mu/\rho$。

流体粘性的本质是由流动流体的内聚力和分子动量交换引起的。一般地，在相同条件下，液体的粘度要大于气体粘度，并随着温度和压强的变化而变化。随着温度的升高，所有液体的粘度都减小，而气体的粘度增大。这是由于液体分子间距较小，相互吸引力即内聚力较大，粘性主要由内聚力造成。随着温度升高，分子间距增大，内聚力减小，从而使液体粘度减小。气体分子间距大，内聚力很小，粘性主要是气体分子动量交换的结果。温度升高时，气体分子运动加快，分子的动量交换速率加剧，切应力随之增加，从而造成粘度的增加。

（5）表面张力特性

液体表面由于分子引力不均衡而产生的沿表面作用于任一界线上的张力，称为表面张力。如自由表面上，气体分子内聚力与液体分子内聚力有显著差别，使液体分子有向内部收缩倾向，这一性质称为表面张力特性。由表面张力引起的最为典型的物理现象为毛细现象，即当细管插入液体时，表面张力会使管中液体自动上升或下降一个高度。当液体与固体壁面接触时，若固体壁面吸附力大于液体内聚力，则液体与固体壁面的接触面有扩大的趋势，称为浸润现象（如水），反之称为不浸润现象（如水银）。

3. 流体的分类

根据流体的压缩性与粘性两个重要的物理性质，可以将流体分为如下几类。

（1）理想与实际流体

根据是否考虑流体的粘性，把流体分为理想流体与实际流体两类。理想流体只是在理论研究初期或简化问题时才采用。

（2）可压缩与不可压缩流体

根据流体压缩性的大小，可以将流体分为可压缩流体与不可压缩流体。密度随压强变化较大且不可视为常数的流体，称为可压缩流体；反之，密度随压强变化很小且可视为常数的流

体，称为不可压缩流体。

除水击现象外，液体均可视为不可压缩流体。而气体分为低速气体（$v<50\text{m/s}$）和高速气体（$v>50\text{m/s}$），低速气体也可视为不可压缩流体，这是由于低速气体的压力和温度在整个流动过程中变化很小，重度和密度变化也很小，可近似看成常数。高速气流则需考虑密度变化的影响，视为可压缩流体。

（3）牛顿与非牛顿流体

根据流体是否满足牛顿内摩擦定律，可以把流体分为牛顿流体与非牛顿流体。符合牛顿内摩擦定律，切应力与速度梯度成正比的流体为牛顿流体。切应力与速度梯度不符合线性分布，不满足牛顿内摩擦定律的流体为非牛顿流体，其又可分为塑性流体、假塑性流体与膨胀性流体3种。

塑性流体有油漆、稀润滑脂等，它们受力后不能立刻变形，必须施加足以破坏其结构性的力才能发生剪切变形，即存在屈服切应力 τ_0，只有克服屈服切应力后，才能开始流动。其切应力与速度梯度满足 $\tau=\tau_0+\mu(\mathrm{d}u/\mathrm{d}y)$。

假塑性流体有高分子溶液、乳化液等，粘度随速度梯度的增大而减少，其切应力与速度梯度的关系为 $\tau=k(\mathrm{d}u/\mathrm{d}y)^n$，$n<1$。$k$ 为稠度系数，取决于流体性质，n 为流变指数，无因次。

膨胀性流体有淀粉糊、石灰浆等，其粘度随速度梯度的增大而增大，其切应力与速度梯度的关系与假塑性流体的表达形式一样，只是指数 $n>1$。

4. 作用在流体上的力

无论是平衡还是运动状态的流体都受到各种力的作用。作用在流体隔离体上的力，按其表现形式可以分为质量力和表面力两种。

（1）质量力

作用在流体每一质点上，且与所作用流体的质量成正比的力为质量力。单位质量流体所受的质量力为单位质量力，形式如下：

$$\vec{f}=\frac{\vec{F}}{m}=f_x\vec{i}+f_y\vec{j}+f_z\vec{k} \tag{1-5}$$

式中：下标 x、y、z 表示 X、Y、Z 3个方向；f 为单位质量力，m/s^2。

最常见的质量力有重力和惯性力两种。重力 $G=mg$，其3个单位质量分力为 $f_x=f_y=0$、$f_z=-g$。直线惯性力 $I=-ma$，其3个单位质量分力为 $f_x=-a_x$、$f_y=-a_y$、$f_z=-a_z$。离心惯性力 $R=m\omega^2r$，绕 Z 轴旋转时3个单位质量分力为 $f_x=\omega^2x$、$f_y=\omega^2y$、$f_z=0$。

（2）表面力

作用在流体表面上，并与受作用流体表面积成正比的力称为表面力。表面力可分为垂直于作用面的压力和平行于作用面的切力两种，单位面积上的压力称为压应力（压强），单位面积上的切力称为切应力。

通过上述分析可知，流体受质量力和表面力两类力的共同作用，在一般运动中，这些力都有可能存在。但在一些特例中，可能只存在其中几个。因此，正确分析作用在流体上的力是研究流体平衡和运动规律的基础。

5. 流体流动的描述

流体运动是由无数质点构成的连续介质的流动，描述流体运动的方法有拉格朗日法和欧拉法两种。

（1）拉格朗日法

拉格朗日法着眼于观察质点的流动情况，通过研究每个质点的位置、压强和流速等物理量随时间的变化规律，综合流场中所有流体质点，得到整个流场的流体运动规律。若以初始坐标 a、b、c 作为标记区别不同质点，则 t 时刻质点位置坐标可表示为 $r=r(a,b,c,t)$，可得流速为 $\vec{u}=\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial r(a,b,c,t)}{\partial t}$，质点加速度为 $a=\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial^2 r(a,b,c,t)}{\partial t^2}$。

（2）欧拉法

欧拉法着眼于整个流场中各空间点流动参数随时间的变化，研究流体压强、流速等物理量在空间点上的分布规律，综合流场中的所有点，便可得到整个流场流动参数的变化规律。用欧拉法描述的流场内各处流速分布可表示为 $\vec{u}=\vec{u}(x,y,z,t)$，加速度的表达式为 $\vec{a}=\frac{\mathrm{d}\vec{u}}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}+(\vec{u}\cdot\nabla)\vec{u}$。可见，加速度由两项组成，其中，$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$ 称为时变加速度（或当地加速度），即表示流动过程中流体质点由于速度随时间变化而引起的加速度；$(\vec{u}\cdot\nabla)\vec{u}$ 称为迁移加速度（或位变加速度），即表示流动过程中流体质点由于速度随位置变化而引起的加速度。

由于研究流体运动常需要从整个流场角度分析流速、压强分布及变化规律，因此，欧拉法运用得更为广泛。

6. 流体流动的分类

根据流体流动过程中物理属性的变化及流体的结构、流态等，可以将流体流动进行下面几种分类。

（1）定常流动与非定常流动

按流动要素是否随时间变化，可以将流体流动分为定常流动与非定常流动。定常流动（又称稳定流或恒定流）是指流场中任一空间点上各运动要素均不随时间变化的流动，而非定常流动（又称非稳定流或非恒定流）中至少有一个运动要素要随时间变化。因此，可用时变加速度来区分定常流或非定常流。若 $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}=0$，可认为是定常流动；若 $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}\neq 0$，则为非定常流动。

（2）均匀流与非均匀流

均匀流是指流场中沿流动方向各点的流速（包括大小与方向）均相同的流动，而非均匀流是指流场中相应点的流速大小和方向只有一个沿程发生改变的流动。因此，可用迁移加速度来区分均匀流或非均匀流。若 $(\vec{u}\cdot\nabla)\vec{u}=0$，如等直径直管中的流体流动，可近似为均匀流动；若 $(\vec{u}\cdot\nabla)\vec{u}\neq 0$，如收缩管、扩张管和弯管内的流体流动为非均匀流动。

（3）渐变流与急变流

非均匀流又可以分为渐变流与急变流，渐变流是指非均匀流中流动沿程变化缓慢，因加速度产生的（离心）惯性力很小，相对于重力可以忽略不计的流动，因此渐变流可近似为均匀流求解问题。而急变流是指流动沿程急剧改变的非均匀流动，其流线间夹角很大或曲率半径较小或两者兼有，因而惯性力不能忽略。

（4）层流与湍流

若流体质点互不掺混，有条不紊地做有序的成层流动，这种流动状态称为层流。反之，流体质点相互掺混，做无序的随机运动，此时的流动状态称为湍流（紊流）。对于湍流而言，其局部速度、压力等物理量在时间和空间中都可能发生不规则的脉动。

根据雷诺数的大小可以判别流体是在做层流还是湍流流动。雷诺数的表达式为 $Re=vl/\upsilon$，对于圆管内流动，特征长度 l 可取为圆管管径 d，其临界雷诺数通常为 2000，即 $Re=vd/\upsilon<2000$ 为层流，否则为湍流。

对于非圆管流动，特征长度 l 取为当量直径 d_H，临界雷诺数根据实际问题而定，如正方形和正三角形管的临界雷诺数仍可近似取为 2000，而偏心环空缝隙仅为 1000。其中，$d_H=4A/\chi$，A 为过流断面面积，单位为 m^2；χ 为湿周，单位为 m。

（5）有旋流与无旋流

流体具有连续变形的性质，因此，除了可表现出刚体质点运动的平移与旋转外，还可以表现出变形运动。按照流体微团运动是否存在旋转，可以将流动分为无旋流动和有旋流动，区分它们的依据为旋转角速度 $\boldsymbol{\varpi}$ 是否等于 0，其表达式为：

$$\boldsymbol{\varpi}=\frac{1}{2}\begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u_x & u_y & u_z \end{vmatrix} \tag{1-6}$$

若 $\boldsymbol{\varpi}=0$，则为无旋流动，否则为有旋流动。

（6）内部流动与外部流动

根据流体所在的流动空间区域，可以将流动分为内部流动和外部流动。内部流动是指在一定结构的限制空间内的流动，如管道和渠道内的流动。外部流动是指流体从物体外侧绕过的流动，如圆柱绕流等。

1.1.2 CFD 基本方程

流体流动要遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律等物理守恒定律。下面详细介绍这些基本守恒定律对应的控制方程。

1. 连续性方程

连续性方程即质量守恒方程，任何流动问题都必须满足质量守恒定律。由单位时间内流出控制体的流体净质量等于同时间间隔控制体内因密度变化而减少的质量，可导出流体流动连续性方程的微分形式为：

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z}=0 \tag{1-7}$$

式中：u_x、u_y、u_z 分别为 X、Y、Z 3 个方向的速度分量，m/s；t 为时间，s；ρ 为密度，kg/m^3。

引入哈密顿微分算子：

$$\nabla=i\frac{\partial}{\partial x}+j\frac{\partial}{\partial y}+k\frac{\partial}{\partial z} \tag{1-8}$$

则式（1-7）可表示为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla \cdot(\rho \vec{u})=0 \tag{1-9}$$

对于圆柱坐标系，连续性方程形式为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\rho u_r}{r}+\frac{\partial(\rho u_r)}{\partial r}+\frac{\partial(\rho u_\theta)}{r\partial \theta}+\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z}=0 \tag{1-10}$$

上面给出的是通用的一般形式的连续性方程。若对于恒定流，$\frac{\partial \rho}{\partial t}=0$，其形式变为：

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z}=0 \tag{1-11}$$

若为不可压缩流动，ρ 为常数，则有：

$$\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}+\frac{\partial u_z}{\partial z}=0 \tag{1-12}$$

其柱坐标系形式为：

$$\frac{u_r}{r}+\frac{\partial u_r}{\partial r}+\frac{\partial u_\theta}{r\partial \theta}+\frac{\partial u_z}{\partial z}=0 \tag{1-13}$$

2. 动量方程

动量方程的本质是满足牛顿第二定律。该定律可描述为：对于一给定的流体微元，其动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和。依据这一定律，可导出 X、Y、Z 3 个方向的动量方程为：

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t}+\nabla \cdot(\rho u_x \vec{u})=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}+\rho f_x \tag{1-14}$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t}+\nabla \cdot(\rho u_y \vec{u})=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}+\rho f_y \tag{1-15}$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t}+\nabla \cdot(\rho u_z \vec{u})=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}+\rho f_z \tag{1-16}$$

式中：p 为流体微元体上的压强，Pa；τ_{xx}、τ_{xy}、τ_{xz} 等是因分子粘性作用而产生的作用在微元体表面上的粘性应力 τ 的分量，Pa；f_x、f_y、f_z 为 3 个方向的单位质量力，m/s^2，若质量力只受重力，且 Z 轴垂直向上，则 $f_x=f_y=0$，$f_z=-g$。

由广义内摩擦定律（本构方程）可得：

$$\tau_{xx}=2\mu\frac{\partial u_x}{\partial x}+\lambda\nabla \cdot \vec{u} \tag{1-17}$$

$$\tau_{yy}=2\mu\frac{\partial u_y}{\partial y}+\lambda\nabla \cdot \vec{u} \tag{1-18}$$

$$\tau_{zz}=2\mu\frac{\partial u_z}{\partial z}+\lambda\nabla \cdot \vec{u} \tag{1-19}$$

$$\tau_{xy}=\tau_{yx}=\mu\left(\frac{\partial u_x}{\partial y}+\frac{\partial u_y}{\partial x}\right) \tag{1-20}$$

$$\tau_{xz}=\tau_{zx}=\mu\left(\frac{\partial u_x}{\partial z}+\frac{\partial u_z}{\partial x}\right) \tag{1-21}$$

$$\tau_{yz}=\tau_{zy}=\mu\left(\frac{\partial u_y}{\partial z}+\frac{\partial u_z}{\partial y}\right) \tag{1-22}$$

式中：μ 为动力粘度，Pa·s；λ 为第二粘度，Pa·s，通常取为−2/3。则式（1-14）~式（1-16）可转化为：

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho u_x\vec{u})=-\frac{\partial p}{\partial x}+\nabla\cdot(\mu\mathrm{grad}u_x)+S_{u_x} \tag{1-23}$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho u_y\vec{u})=-\frac{\partial p}{\partial y}+\nabla\cdot(\mu\mathrm{grad}u_y)+S_{u_y} \tag{1-24}$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho u_z\vec{u})=-\frac{\partial p}{\partial z}+\nabla\cdot(\mu\mathrm{grad}u_z)+S_{u_z} \tag{1-25}$$

式中：S_{u_x}、S_{u_y}、S_{u_z} 为广义源项，$S_{u_x}=\rho f_x+s_x$，$S_{u_y}=\rho f_y+s_y$，$S_{u_z}=\rho f_z+s_z$，其中 s_x、s_y、s_z 为：

$$s_x=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u_x}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u_y}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial u_z}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial x}(\lambda\nabla\cdot\vec{u}) \tag{1-26}$$

$$s_y=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u_x}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u_y}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial u_z}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}(\lambda\nabla\cdot\vec{u}) \tag{1-27}$$

$$s_z=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u_x}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u_y}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial u_z}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial z}(\lambda\nabla\cdot\vec{u}) \tag{1-28}$$

对于粘性为常数的不可压缩流体，s_x、s_y、s_z 通常取为 0。

3. 能量方程

能量守恒定律是包含有热交换的流动系统必须满足的基本定律，其本质是热力学第一定律。依据能量守恒定律，微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流通量加上质量力与表面力对微元体所做的功，可得其表达式为：

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}+\nabla\cdot[\vec{u}(\rho E+p)]=\nabla\cdot\left[k_{eff}\nabla T-\sum_j h_j J_j+(\tau_{eff}\cdot\vec{u})\right]+S_h \tag{1-29}$$

式中：E 为流体微团的总能，J/kg，包含内能、动能和势能之和，$E=h-p/\rho+u^2/2$；h 为焓，J/kg；h_j 为组分 j 的焓，J/kg；k_{eff} 为有效热传导系数，W/(m·K)，$k_{eff}=k+k_t$，k_t 为湍流热传导系数，根据所用的湍流模型来确定；J_j 为组分 j 的扩散通量；S_h 为包括了化学反应热及其他用户定义的体积热源项。

提示：尽管能量方程是流动、传热问题的基本方程，但对于不可压缩流动，若热交换小到可以忽略时，可不考虑能量方程。

4. 气体动力学方程

流体包括气体，而气体具有明显的可压缩性，即在流动过程中其密度是变量，需要充分考虑其压缩性对流动的影响，气体动力学正是以可压缩气体流动规律为研究对象的。

理想气体符合状态方程 $p/\rho=RT$，在常温常压下，实际气体基本符合状态方程，若考虑其压缩性，状态方程可改写为 $p=Z\rho RT$，Z 为实际气体的压缩系数。

气体不同过程的状态参数变化情况不一。等温过程是指热力学系统在恒定温度下发生的各种物理或化学变化过程，其 p/ρ 为常数。在整个等温过程中，系统与其外界处于热平衡状态。如活塞推动气筒对恒温箱内气体缓慢压缩，所做功等于流进容器内使气体温度保持不变的能量。蓄电池在室温下缓慢充电和放电，都可近似为等温过程。等压过程是热力学系统在发生物理或化学变化过程时，其物质系统的压强始终保持恒定，ρRT 为常数。等压过程能量转化的特点是系统吸收的热量等于系统内能的增量和系统对外所做功之和。如水蒸气在锅炉加热器内受热的过程、气缸中的气体在大气压下受热缓慢膨胀的过程等。定容过程是物质系统的体积保持不变的情况下所发生的各种物理或化学变化过程，其 p/T 为常数。由于在等容过程中系统对外界不做功，所以，当系统的温度升高时，将从外界吸收热量，并全部转变为自身内能的增加。绝热过程是指系统与外界无热量交换时的状态变化过程，p/ρ^n 为常数。绝热过程分为可逆过程和不可逆过程（熵增不为 0）两种。可逆（熵增为 0）的绝热过程是等熵过程，即系统与外界既没有热量交换，也没有能量交换，简称无能耗的绝热过程，其 p/ρ^k 等于常数，k 为卡门系数，对于空气而言，k=1.4。

气体运动最重要的两个物性参数是声速和马赫数。声速是指微弱压力扰动波在可压缩介质中的传播速度。在实际气流中，由于气体具有可压缩性，某一扰动不能在一瞬间传遍整个流场，而是以波面的形式逐渐向前推进的。声速公式表示为：

$$c=\sqrt{\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\rho}}=\sqrt{kRT} \tag{1-30}$$

马赫数为某处气流速度 v 与该处声速 c 的比值，记作 Ma，其表达式为：

$$Ma=\frac{v}{c} \tag{1-31}$$

Ma 为气体动力学中十分重要的一个无量纲物理参数，可衡量气体压缩性的大小，Ma 越大，可压缩性影响就越大。$Ma>1$ 的气流为超声速气流；$Ma<1$ 的气流为低声速气流；$Ma=1$ 的气流为声速气流。

将流动的气体等熵地滞止到储气箱内，使其变为静止的气体，此时相应的运动参数称为滞止参数。滞止参数用下标 0 表示，如 p_0、ρ_0、T_0，其表达式如下：

$$\frac{p_0}{p}=(1+\frac{k-1}{2}Ma^2)^{\frac{k}{k-1}} \tag{1-32}$$

$$\frac{\rho_0}{\rho}=(1+\frac{k-1}{2}Ma^2)^{\frac{1}{k-1}} \tag{1-33}$$

$$\frac{T_0}{T}=1+\frac{k-1}{2}Ma^2 \tag{1-34}$$

当 Ma=0.3 时，空气的 ρ_0/ρ=1.04561，密度变化不足 5%。而对于 20℃的空气来说，$Ma=v/c=v/343<0.3$，即 $v<103.2$m/s，可见，低速气流的密度变化较小。

常温下，空气的运动速度 v=0~48m/s 时，$Ma<0.14$，其密度变化不大于 1%。因此，当空气的速度 $v<50$m/s 时，可视作不可压缩流体。

5. 基本方程的初始及边界条件

初始条件和边界条件是控制方程有确定解的前提，控制方程与相应的初始条件和边界条件构成对一个物理过程完整的数学描述。现有的 CFD 软件都提供了现成的各种类型的边界条件，下面简单介绍有关的初始条件和边界条件。

（1）初始条件

初始条件是所研究对象在过程开始时刻各个求解变量的空间分布情况，顾名思义，就是计算初始时刻给定的参数。如 $t=t_0$ 时，各变量的函数分布为：

$$u_x=u_x(x,y,z,t_0)=u_{x_0}(x,y,z) \tag{1-35 a}$$

$$u_y=u_y(x,y,z,t_0)=u_{y_0}(x,y,z) \tag{1-35 b}$$

$$u_z=u_z(x,y,z,t_0)=u_{z_0}(x,y,z) \tag{1-35 c}$$

$$p=p(x,y,z,t_0)=p_0(x,y,z) \tag{1-35 d}$$

$$\rho=\rho(x,y,z,t_0)=\rho_0(x,y,z) \tag{1-35 e}$$

$$T=T(x,y,z,t_0)=T_0(x,y,z) \tag{1-35 f}$$

对于非定常问题，必须给定初始条件，而对于定常问题，不需要初始条件。

（2）边界条件

边界条件是在求解区域的边界上所求解的变量或其导数随地点和时间的变化规律。对于任何问题，都必须给定边界条件。例如，流体在固体壁面包裹的空间内流动，不能有穿过固壁的速度分量；在自由液面上，大气压强认为是常数；在流体与外界无热传导的边界上，流体与边界之间无温差等。通常，流体边界可分为流-固交界面和流-流（液-液、液-气）交界面。

流体在管内流动时的管壁，飞机、船舶在空气及水中运动时的气-固或液-固交界面，河水在岸边及河床的液-固交界面都属于流-固交界面。

对于粘性流体，流体将粘附于固体表面，满足无滑移边界条件，即：

$$v|_F=v|_S \tag{1-36}$$

式中：$v|_F$ 是流体速度，m/s；$v|_S$ 是固体壁面相应点的速度，m/s。

对于理想流体，流体可沿界面滑移，即有速度的切向分量，但不能脱离界面，即：

$$v_n|_F=v_n|_S \tag{1-37}$$

式中：$v_n|_F$ 为流体的法向速度分量，m/s；$v_n|_S$ 为固体壁面相应点的法向速度分量，m/s。

密度不同的两种液体的交界面，如油和水，属于液-液交界面。对于此类分界面两侧的液体应满足 $v_1=v_2$、$T_1=T_2$、$p_1=p_2$，及：

$$\mu_1\frac{\partial u}{\partial n}\bigg|_1=\mu_2\frac{\partial u}{\partial n}\bigg|_2 \tag{1-38 a}$$

$$k_1\frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_1=k_2\frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_2 \tag{1-38 b}$$

水与大气的接触面是自由液面，即液-气交界面。自由液面的运动学条件为：

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\bar{u}\cdot\nabla F=0 \tag{1-39}$$

式中：F 代表自由液面上的所有物理变量。

当不考虑表面张力时，自由液面压强应满足 P=Pa，Pa 为大气压强，一个标准大气压为 101.325KPa。

1.1.3 CFD 的发展

计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）是建立在经典流体动力学与数值计算方法基础之上的一门新型独立学科，其基本定义是通过计算机进行数值计算和图像显示，分析包括流体流动和热传导等相关物理现象的系统。它兼有理论性和实践性的双重特点，建立了许多理论和方法，为现代科学中许多复杂流动与传热问题提供了有效的计算技术。

CFD 方法与传统的理论分析方法、实验量测方法组成了研究流体流动问题的完整体系。理论分析方法的优点在于所得结果具有普遍性，各种影响因素清晰可见，是指导实验研究和验证新的数值计算方法的理论基础，但是，它往往要求对计算对象进行抽象和简化，才能得出理论解。对于非线性情况，只有少数流动才能给出解析解。实验测量方法是理论分析和数值方法的基础，其重要性不可低估，然而，实验往往受到模型尺寸、流场扰动、人为因素和测量精度的限制，且还需投入相对较多的经费、人力和物力。而 CFD 方法很好地克服了理论分析与实验研究的弱点，在计算机上实现一个特定的计算，且可以形象地再现流动情景。

CFD 进行流动和传热现象分析的基本思想是：用一系列有限离散点上的变量值的集合来代替空间域上连续的物理量的场，如速度场和压力场；然后，按照一定的方式建立这些离散点上变量之间关系的代数方程组，通过求解代数方程组获得场变量的近似值。它可以看作是在流动基本方程控制下对流动的数值模拟。通过这种数值模拟，我们可以得到极其复杂问题的流场内各个位置上基本物理量的分布，以及这些物理量随时间的变化情况，确定漩涡分布特性、空化特性及脱流区等。还可据此计算出相关的其他物理量，如旋转式流体机械的转矩、水力损失和效率等。此外，它与 CAD 联合，还可以进行结构优化设计等。

CFD 具有适应性强、应用面广的优点。由于流体问题的控制方程一般是非线性的，自变量多，计算域的几何形状和边界条件复杂，很难求得解析解，只有用 CFD 方法才有可能求得满足工程需要的数值解。另外，CFD 方法不受物理模型和实验模型的限制，省钱省时，有较多的灵活性，能给出详细和完整的数值计算结果，很容易模拟特殊尺寸、高温、有毒、易燃等真实条件和实验中只能接近而无法达到的理想条件。然而，CFD 也存在一定的局限，其数值解法是一种离散近似计算方法，依赖于“物理上合理、数学上适用”，适合于在计算机上进行计算的离散的有限数学模型，且最终结果不能提供任何形式的解析表达式，只能得到有限数量离散点上的数值解，并有一定的计算误差。此外，CFD 软件的应用很大程度上依赖于经验和技巧。

CFD 方法依赖于系统的流体动力学知识和较深入的数理基础，虽然商用 CFD 软件减轻了用户在这方面的压力，但是学习和掌握 CFD 还不是一件容易的事，需要读者在熟悉 CFD 基本理论的基础上掌握相关软件的模拟功能，在不断地练习和实战中总结经验和技巧。

CFD 的应用与计算机技术的发展密切相关。CFD 软件最早于 20 世纪 70 年代诞生于美国，但近 10 年才真正得到较广泛的应用。

为了完成 CFD 计算，早期需要用户自己编写计算程序，但由于 CFD 的复杂性及计算机软硬件的多样性，使得用户各自的应用程序往往缺乏通用性，而 CFD 本身又有其鲜明的系统性与规律性，因此，比较适合于被制成通用的商用软件。

1. CFD 软件

自 1981 年以来，出现了如 PHOENICS、CFX、STAR-CD、FIDAP 和 FLUENT 等多个商用 CFD 软件，且随着计算机技术的进一步快速发展，这些商用软件在工程界正发挥着越来越大的作用，下面分别进行介绍。

（1）PHOENICS

PHOENICS 是世界上第一个投放市场的 CFD 商业软件，可以算是 CFD 商用软件的鼻祖。这一软件中所采用的一些基本算法，如 SIMPLE 方法、混合格式等，正是由该软件的创始人 D.B.Spalding 及其合作者 S.V.Patankar 等提出的，对以后开发的商业软件有较大的影响。近年来，PHOENICS 软件在功能与方法方面做了较大的改进，包括纳入拼片式多网格及细密网格嵌入技术、同位网格及非结构化网格技术；在湍流模型方面开发了通用的零方程、低 Reynolds k-ε 模型和 RNG k-ε 模型等。应用该软件可计算大量的实际工作问题，包括城市污染预测、叶轮中的流动和管道流动等。

（2）CFX

CFX 软件采用有限容积法和拼片式块结构化网络，在非正交曲线坐标（适体坐标）系上进行离散，变量的布置采用同位网格方式。对流项的离散格式包括一阶迎风、混合格式、QUICK、CONDIF、MUSCI 及高阶迎风格式。压力与速度的耦合关系采用 SIMPLE 系列算法（SIMPLEC），代数方程求解的方法中包括线迭代、代数多重网格、ICCG、STONE 强隐方式及块隐式（BIM）。该软件可以计算不可压缩及可压缩流动、耦合传热、多相流、化学反应和气体燃烧等问题。

（3）STAR-CD

STAR-CD 是英文 Simulation of Turbulent Flow in Arbitrary Region 的缩写，连字符后的 CD 是开发商 Computational Dynamics Ltd 的简称。它是基于有限容积法的一个通用软件。在网格生成方面，采用非结构化网格，单元的形态可以有六面体、四面体、三角形截面的棱柱体、金字塔形的锥体及 6 种形状的其他多面体。应用该软件可以计算稳态与非稳态流动、牛顿流体及非牛顿流体的流动、多孔介质中的流动、亚音速及超音速流动，并且这一软件在世界汽车工业中的应用十分广泛。

（4）FIDAP

FIDAP 是英语 Fluid Dynamics Analysis Package 的缩写，于 1983 年由美国 Fluid Dynamics International Inc.推出，是世界上第一个使用有限元法（FEM）的 CFD 软件。可以接受如 I-DEAS、PATRAN、ANSYS 和 ICEMCFD 等软件所产生的网格。该软件可以计算可压缩及不可压缩流、层流与湍流、单相流与两相流、牛顿流体及非牛顿流体的流动问题。

（5）FLUENT

FLUENT 软件由美国 FLUENT Inc.于 1983 年推出，是继 PHOENICS 软件之后的第二个投放市场的基于有限容积法的软件。它包含结构化及非结构化网格两个版本。在结构化网格版本中有适体坐标的前处理软件，同时也可以纳入 I-DEAS、PATRAN、ANSYS 和 ICEM-CFD 等著名

网格生成软件所产生的网格。速度与压力耦合采用同位网格上的 SIMPLEC 算法。对流项差分格式纳入了一阶迎风、中心差分及 QUICK 等格式。该软件能计算可压缩及不可压缩流动、含有粒子的蒸发、燃烧过程和多组分介质的化学反应过程等问题。

2. CFD 软件的基本环节

所有的商用 CFD 软件均包括前处理、求解、后处理 3 个基本环节，与之对应的程序模块常简称前处理器、求解器、后处理器。

（1）前处理器

前处理器用于完成前处理工作。前处理环节是向 CFD 软件输入所求问题的相关数据，该过程一般是借助于求解器相对应的对话框等图形界面来完成的。用户需要定义所求问题的几何计算区域，并将计算区域划分成多个互不重叠的子区域，形成由单元组成的网格；然后，对所要研究的物理和化学现象进行抽象，选择相应的控制方程；最后，定义流体的物性参数和初边界条件。目前，用商用 CFD 软件计算数值时，超过 50%的时间花在几何区域的定义和计算网格的生成上，我们可以使用 CFD 软件自身的前处理器来生成几何模型，也可以借助其他商用 CFD 或 CAD/CAE 软件提供的几何模型。

（2）求解器

求解器的核心是数值求解算法。常用的数值求解方案包括有限差分、有限元、谱方法和有限体积法等。总体而言，这些方法的求解过程大致相同，都是首先借助简单函数来近似待求解的流动变量，然后将近似关系代入连续型的控制方程中，形成离散方程组，最后求解代数方程组。各种数值求解方案的主要区别在于流动变量被近似的方式及相应的离散化过程。

（3）后处理器

帮助用户对流体计算结果进行观察和分析，包括计算区域的几何模型及网格显示、速度矢量图、各物理量的等值线图/云图、XY 散点图和粒子轨迹图等。借助后处理功能，还可以动态模拟流动效果，直观地了解 CFD 的计算结果。

3. CFD 的应用场合

近几十年来，CFD 有了很大的发展，所有涉及流体流动、热交换和分子输运等现象的问题，几乎都可以通过计算流体力学的方法进行分析和模拟。CFD 不仅可以作为一个研究工具，而且还可以作为设计工具，在水利工程、土木工程、石油工程、天然气工程、环境工程、食品工程和海洋结构工程等领域发挥作用。CFD 典型的应用场合及相关的工程问题如下：

- 水轮机、风机和水泵等流体机械内部的流体流动。
- 石油、天然气的地下渗透、开采及储运。
- 飞机和航天飞机等飞行器的设计。
- 汽车流线外形对性能的影响。
- 洪水波及河口潮流计算。
- 流体机械的结构设计与优化。
- 风载荷对大桥、高层建筑物稳定性及结构性能的影响。
- 温室及室内的空气流动及环境分析。
- 电子元器件的冷却。

- 换热器性能分析及换热器片形状的选取。
- 河流中污染物的扩散。
- 汽车尾气对街道环境的污染。
- 食品中细菌的运移。

对这些问题的处理，过去主要借助于基本的理论分析和大量的物理模型实验，而现在大多采用 CFD 的方式加以分析和解决，CFD 技术现已发展到完全可以分析三维粘性湍流及漩涡运动等复杂问题的程度。

CFD 的求解过程包括建立控制方程、确定边界条件与初始条件、划分计算网格、建立离散方程、离散初始条件和边界条件、给定求解控制参数、求解离散方程、判断解的收敛性、显示和输出计算结果等步骤。为了便于用户将主要的精力集中在基本的物理原理上，目前已经有很多优秀的 CFD 商用软件投入使用。

1.1.4 有限体积法基础

有限体积法（简称 FVM）又称有限容积法，是近年来发展非常迅速的一种离散化方法，其特点是计算效率高，目前在 CFD 领域得到了广泛的应用，大多数商用 CFD 软件都采用了这种方法，如 FLUENT、STAR-CD 和 CFX 等。

有限体积法将所计算的区域划分成一系列控制体积，每个控制体积都有一个节点作代表，通过将控制方程对控制体积作积分来导出离散方程。在积分的过程中，需要对控制体积界面上的被求函数本身（对流通量）及其一阶导数（扩散通量）的构成做出假定，这就形成了不同的格式。由于扩散项多是采用相当于二阶精度的线性插值，因而格式的区别主要体现在对流项上。

用有限体积法导出的离散方程可以保证其具有守恒特性，而且离散方程系数的物理意义明确，是目前流动与传热问题的数值计算中应用最广泛的一种方法。

由于流体控制方程较多，为研究方便，可以将控制方程写成通用变量方程的形式，如下：

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t}+\operatorname{div}(\rho\varphi\vec{u})=\operatorname{div}(\Gamma\cdot\operatorname{grad}\varphi)+S_{\varphi} \tag{1-40}$$

式中的 φ、Γ、S_{φ} 的取值如表 1-1 所示。

表 1-1　通用变量方程中的各参量取值

方　程	φ	Γ	S_{φ}
连续性方程	1	0	0
x-动量方程	u	μ	$-(\partial p/\partial x)+S_{Mx}$
y-动量方程	v	μ	$-(\partial p/\partial y)+S_{My}$
z-动量方程	w	μ	$-(\partial p/\partial z)+S_{Mz}$
能量方程	i	K	$-p\cdot\operatorname{div}(\vec{u})+\Phi+S_i$
紊动能方程	k	$\mu+\mu_t/\sigma_k$	$-\rho\varepsilon+\mu_t P_G$
紊动耗散率方程	ε	$\mu+\mu_t/\sigma_\varepsilon$	$-\rho C_2(\varepsilon^2/k)+\mu_t C_1(\varepsilon/k)P_G$

写成通用变量的形式，是为下一步离散做准备，这样只需离散一个通用变量方程即可。通用变量方程的意义为：

$$\varphi_{\text{随时间的变化率}}+\varphi_{\text{由于对流引起的流出率}}=\varphi_{\text{由于扩散引起的增加率}}+\varphi_{\text{由于源项引起的增加率}} \tag{1-41}$$

采用有限体积法对方程进行离散，即将微分方程式（1-40）在控制容积内进行积分：

$$\int_V \frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t}\mathrm{d}V+\int_V \mathrm{div}(\rho\varphi\vec{u})\mathrm{d}V=\int_V \mathrm{div}(\Gamma\cdot\mathrm{grad}\varphi)\mathrm{d}V+\int_V S_\varphi \mathrm{d}V \tag{1-42}$$

利用奥氏公式或高斯定律，式（1-42）可转化为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\int_V \rho\varphi \mathrm{d}V\right)+\int_A \vec{n}\cdot(\rho\varphi\vec{u})\mathrm{d}A=\int_A \vec{n}\cdot(\Gamma\cdot\mathrm{grad}\varphi)\mathrm{d}A+\int_V S_\varphi \mathrm{d}V \tag{1-43}$$

对于稳态问题，由于时间相关项等于 0，式（1-43）变为：

$$\int_A \vec{n}\cdot(\rho\varphi\vec{u})\mathrm{d}A=\int_A \vec{n}\cdot(\Gamma\cdot\mathrm{grad}\varphi)\mathrm{d}A+\int_V S_\varphi \mathrm{d}V \tag{1-44}$$

对于非稳态问题，还需在时间间隔 Δt 内积分，则式（1-43）变为：

$$\int_{\Delta t}\frac{\partial}{\partial t}\left(\int_V \rho\varphi \mathrm{d}V\right)\mathrm{d}t+\int_{\Delta t}\int_A \vec{n}\cdot(\rho\varphi\vec{u})\mathrm{d}A\mathrm{d}t=\int_{\Delta t}\int_A \vec{n}\cdot(\Gamma\cdot\mathrm{grad}\varphi)\mathrm{d}A\mathrm{d}t+\int_{\Delta t}\int_V S_\varphi \mathrm{d}V\mathrm{d}t \tag{1-45}$$

下面以三维对流扩散问题为例，介绍有限体积法的离散过程。三维对流扩散问题的控制微分方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u\varphi)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho v\varphi)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho w\varphi)=\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)+S \tag{1-46}$$

采用图 1-1 所示的离散网格系统，对方程式（1-46）在控制容积内积分，则有：

$$\begin{aligned}\int_{\Delta V}\frac{\partial}{\partial x}(\rho u\varphi)\mathrm{d}V+\int_{\Delta V}\frac{\partial}{\partial y}(\rho v\varphi)\mathrm{d}V+\int_{\Delta V}\frac{\partial}{\partial z}(\rho w\varphi)\mathrm{d}V=\int_{\Delta V}\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)\mathrm{d}V+\\ \int_{\Delta V}\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)\mathrm{d}V+\int_{\Delta V}\frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)\mathrm{d}V+\int_{\Delta V}S\mathrm{d}V\end{aligned} \tag{1-47}$$

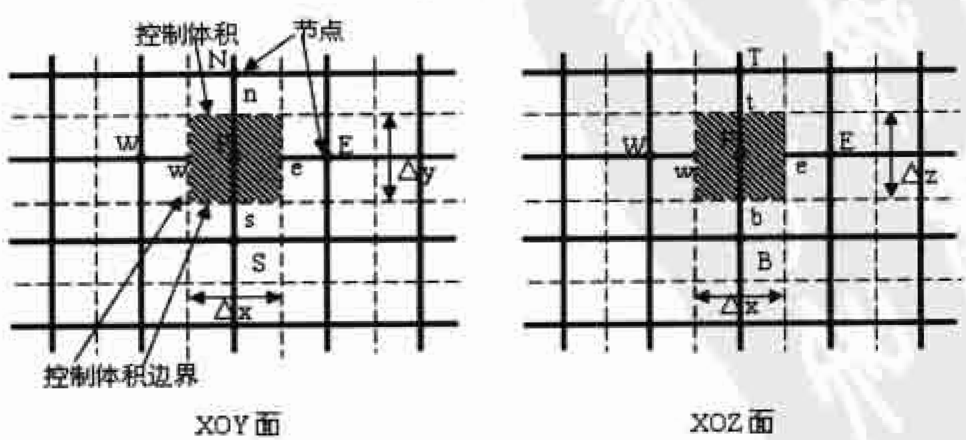


图 1-1　三维问题的有限体积法计算网格

针对内部节点（P 点）研究其控制方程的离散形式，W、E 分别为 P 节点左右侧邻近节点

（相当于西、东两侧），N、S 分别为 P 节点前后侧邻近节点（相当于北、南两侧），T、B 分别为 P 节点上下侧邻近节点，由图 1-1 可知，对于结构化网格，控制容积的边界面积 $A_w = A_e = \Delta y \Delta z$，$A_n = A_s = \Delta x \Delta z$，$A_t = A_b = \Delta x \Delta y$，于是由奥氏公式，方程式（1-47）可写成：

$$\left[(\rho u\varphi A)_e-(\rho u\varphi A)_w\right]+\left[(\rho v\varphi A)_n-(\rho v\varphi A)_s\right]+\left[(\rho w\varphi A)_t-(\rho w\varphi A)_b\right]=$$
$$\left(\Gamma A\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)_e-\left(\Gamma A\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)_w+\left(\Gamma A\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)_n-\left(\Gamma A\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)_s+\left(\Gamma A\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)_t-\left(\Gamma A\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)_b+\bar{S}\Delta x\Delta y\Delta z \quad (1\text{-}48)$$

采用线性插值（中央差分）可得：

$$(\rho u\varphi A)_e=(\rho u)_e A_e\varphi|_e=(\rho u)_e A_e\frac{\varphi_E+\varphi_P}{2} \quad (1\text{-}49\ \text{a})$$

$$(\rho u\varphi A)_w=(\rho u)_w A_w\varphi|_w=(\rho u)_w A_w\frac{\varphi_P+\varphi_W}{2} \quad (1\text{-}49\ \text{b})$$

$$(\rho v\varphi A)_n=(\rho v)_n A_n\varphi|_n=(\rho v)_n A_n\frac{\varphi_N+\varphi_P}{2} \quad (1\text{-}49\ \text{c})$$

$$(\rho v\varphi A)_s=(\rho v)_s A_s\varphi|_s=(\rho v)_s A_s\frac{\varphi_P+\varphi_S}{2} \quad (1\text{-}49\ \text{d})$$

$$(\rho w\varphi A)_t=(\rho w)_t A_t\varphi|_t=(\rho w)_t A_t\frac{\varphi_T+\varphi_P}{2} \quad (1\text{-}49\ \text{e})$$

$$(\rho w\varphi A)_b=(\rho w)_b A_b\varphi|_b=(\rho w)_b A_b\frac{\varphi_P+\varphi_B}{2} \quad (1\text{-}49\ \text{f})$$

$$\left(\Gamma A\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)_e=\Gamma_e A_e\left.\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right|_e=\Gamma_e A_e\frac{\varphi_E-\varphi_P}{\delta x_{PE}} \quad (1\text{-}49\ \text{g})$$

$$\left(\Gamma A\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)_w=\Gamma_w A_w\left.\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right|_w=\Gamma_w A_w\frac{\varphi_P-\varphi_W}{\delta x_{WP}} \quad (1\text{-}49\ \text{h})$$

$$\left(\Gamma A\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)_n=\Gamma_n A_n\left.\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right|_n=\Gamma_n A_n\frac{\varphi_N-\varphi_P}{\delta y_{PN}} \quad (1\text{-}49\ \text{i})$$

$$\left(\Gamma A\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)_s=\Gamma_s A_s\left.\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right|_s=\Gamma_s A_s\frac{\varphi_P-\varphi_S}{\delta y_{SP}} \quad (1\text{-}49\ \text{j})$$

$$\left(\Gamma A\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)_t=\Gamma_t A_t\left.\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right|_t=\Gamma_t A_t\frac{\varphi_T-\varphi_P}{\delta z_{PT}} \quad (1\text{-}49\ \text{k})$$

$$\left(\Gamma A\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)_b=\Gamma_b A_b\left.\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right|_b=\Gamma_b A_b\frac{\varphi_P-\varphi_B}{\delta z_{BP}} \quad (1\text{-}49\ \text{l})$$

源项也用线性化处理可得：

$$\bar{S}\Delta V=S_u+S_P\varphi_P \quad (1\text{-}49\ \text{m})$$

令 $F_e=(\rho u)_e A_e$，$F_w=(\rho u)_w A_w$，$F_n=(\rho u)_n A_n$，$F_s=(\rho u)_s A_s$，$F_t=(\rho u)_t A_t$，$F_b=(\rho u)_b A_b$，$D_e=\frac{\Gamma_e A_e}{\delta x_{PE}}$，$D_w=\frac{\Gamma_w A_w}{\delta x_{WP}}$，$D_n=\frac{\Gamma_n A_n}{\delta y_{PN}}$，$D_s=\frac{\Gamma_s A_s}{\delta y_{SP}}$，$D_t=\frac{\Gamma_t A_t}{\delta z_{PT}}$，$D_b=\frac{\Gamma_b A_b}{\delta z_{BP}}$，代入式（1-49）后，代入式（1-48），可得：

$$\frac{F_e}{2}(\varphi_E+\varphi_P)-\frac{F_w}{2}(\varphi_P+\varphi_W)+\frac{F_n}{2}(\varphi_N+\varphi_P)-\frac{F_s}{2}(\varphi_P+\varphi_S)+$$
$$\frac{F_t}{2}(\varphi_T+\varphi_P)-\frac{F_b}{2}(\varphi_P+\varphi_B)=D_e(\varphi_E-\varphi_P)-D_w(\varphi_P-\varphi_W)+ \tag{1-50}$$
$$D_n(\varphi_N-\varphi_P)-D_s(\varphi_P-\varphi_S)+D_t(\varphi_T-\varphi_P)-D_b(\varphi_P-\varphi_B)+S_u+S_P\varphi_P$$

整理节点变量，有：

$$\left[\left(D_w-\frac{F_w}{2}\right)+\left(D_e+\frac{F_e}{2}\right)+\left(D_s-\frac{F_s}{2}\right)+\left(D_n+\frac{F_n}{2}\right)+\left(D_b-\frac{F_b}{2}\right)+\left(D_t+\frac{F_t}{2}\right)-S_P\right]\varphi_P$$
$$=\left(D_w+\frac{F_w}{2}\right)\varphi_W+\left(D_e-\frac{F_e}{2}\right)\varphi_E+\left(D_s+\frac{F_s}{2}\right)\varphi_S+\left(D_n-\frac{F_n}{2}\right)\varphi_N \tag{1-51}$$
$$+\left(D_b+\frac{F_b}{2}\right)\varphi_B+\left(D_t-\frac{F_t}{2}\right)\varphi_T+S_u$$

这时，需要在 φ_P 系数中引入 $F_e-F_e+F_w-F_w+F_s-F_s+F_n-F_n+F_t-F_t+F_b-F_b$，则式（1-51）变为：

$$\left[\begin{aligned}&\left(D_w+\frac{F_w}{2}\right)+\left(D_e-\frac{F_e}{2}\right)+\left(D_s+\frac{F_s}{2}\right)+\left(D_n-\frac{F_n}{2}\right)+\left(D_b+\frac{F_b}{2}\right)\\&+\left(D_t-\frac{F_t}{2}\right)+(F_e-F_w)+(F_n-F_s)+(F_t-F_b)-S_P\end{aligned}\right]\varphi_P$$
$$=\left(D_w+\frac{F_w}{2}\right)\varphi_W+\left(D_e-\frac{F_e}{2}\right)\varphi_E+\left(D_s+\frac{F_s}{2}\right)\varphi_S+\left(D_n-\frac{F_n}{2}\right)\varphi_N+ \tag{1-52}$$
$$\left(D_b+\frac{F_b}{2}\right)\varphi_B+\left(D_t-\frac{F_t}{2}\right)\varphi_T+S_u$$

设 $a_W=D_w+F_w/2$，$a_E=D_e-F_e/2$，$a_S=D_s+F_s/2$，$a_N=D_n-F_n/2$，$a_B=D_b+F_b/2$，$a_T=D_t-F_t/2$，$\Delta F=F_e-F_w+F_n-F_s+F_t-F_b$，$a_P=a_W+a_E+a_S+a_N+a_B+a_T+\Delta F-S_P$，则式（1-52）可转化为：

$$a_P\varphi_P=a_W\varphi_W+a_E\varphi_E+a_S\varphi_S+a_N\varphi_N+a_T\varphi_T+a_B\varphi_B+S_u \tag{1-53}$$

式（1-53）就是三维对流扩散问题的离散方程格式，适用于三维问题计算区域所有内部节点的离散方程构造。

有限体积法除了采用上述的中心差分格式离散外，还有多种离散格式，如统一的离散方程为：

$$a_p\phi_p=a_w\phi_w+a_{ww}\phi_{ww}+a_E\phi_E+a_{EE}\phi_{EE} \tag{1-54}$$

式中，a_p 取值取决于问题的阶数，对于一阶问题，$a_p=a_w+a_E+(F_e-F_w)$，对于二阶问题，$a_p=a_w+a_E+a_{ww}+a_{EE}+(F_e-F_w)$，其中，$a_w$、$a_{ww}$、$a_E$ 和 a_{EE} 取决于所使用的离散格式，如表 1-2 所示。

对于任何一种离散格式，读者都希望其既具有稳定性，又具有较高的精度，同时又能适应于不同的流动形式，但是实际上这种理想的离散格式是不存在的。表 1-3 为离散格式的粗略对比，方便用户实际计算时选用。

表 1-2 不同离散格式下系数 a_W、a_{WW}、a_E、a_{EE} 的计算公式

离散格式	系数 a_W、a_{WW}	系数 a_E、a_{EE}
中心差分格式	$a_w=D_w+F_w/2$	$a_E=D_e-F_e/2$
一阶迎风格式	$a_w=D_w+\max(0,F_w)$	$a_E=D_e+\max(0,-F_e)$
混合格式	$a_w=\max[F_w,(D_w+F_w/2),0]$	$a_E=\max[-F_e,(D_e-F_e/2),0]$
指数格式	$a_w=\dfrac{F_w\exp(F_w/D_w)}{\exp(F_w/D_w)-1}$	$a_E=\dfrac{F_e}{\exp(F_e/D_e)-1}$
乘方格式	$a_w=D_w\max[0,(1-0.1\|P_e\|)^5]+\max(F_w,0)$	$a_E=D_e\max[0,(1-0.1\|P_e\|)^5]+\max(-F_e,0)$
二阶迎风格式	$a_w=D_w+\frac{3}{2}\alpha F_w+\frac{1}{2}\alpha F_e$ $a_{ww}=-\frac{1}{2}\alpha F_w$	$a_e=D_e-\frac{3}{2}(1-\alpha)F_e-\frac{1}{2}(1-\alpha)F_w$ $a_{ww}=\frac{1}{2}(1-\alpha)F_e$
QUICK 格式	$a_w=D_w+\frac{6}{8}\alpha_w F_w+\frac{1}{8}\alpha_w F_e+\frac{3}{8}(1-\alpha_w)F_w$ $a_{ww}=-\frac{1}{8}\alpha_w F_w$	$a_E=D_e-\frac{3}{8}\alpha_e F_e-\frac{6}{8}(1-\alpha_e)F_e-\frac{1}{8}(1-\alpha_e)F_w$ $a_{EE}=\frac{1}{8}(1-\alpha_e)F_e$

表 1-3 常见离散格式的性能对比

离散格式	稳定性及稳定条件	精度及经济性
中心差分格式	条件稳定 $P_e\leqslant 2$	在不发生振荡的参数范围内可获得较准确的结果
一阶迎风格式	绝对稳定	虽然可以获得物理上可接受的解，但当 P_e 较大时，假扩散较严重。为避免此问题，常需要加密计算网格
混合格式	绝对稳定	当 $P_e\leqslant 2$ 时，性能与中心差分格式相同；当 $P_e>2$ 时，性能与一阶迎风格式相同
指数格式	绝对稳定	主要适用于无源项的对流-扩散问题。对有非常数源项的场合，当 P_e 较高时有较大误差
乘方格式	绝对稳定	与指数格式相同
二阶迎风格式	绝对稳定	精度较一阶迎风格式高，但仍有假扩散问题
QUICK 格式	条件稳定 $P_e\leqslant 8/3$	可以减少假扩散误差，精度较高，应用较广泛，但主要用于六面体或四边形网格
改进的 QUICK 格式	绝对稳定	性能与 QUICK 格式相同，但不存在稳定性问题

1.2 FLUENT 软件简介

FLUENT 是目前处于世界领先地位的商业 CFD 软件包之一，在流体建模中被广泛采用，最初由 FLUENT Inc.公司于 1983 年开始发行，2006 年 2 月 ANSYS Inc.公司收购 FLUENT Inc.公司

后成为全球最大的 CAE 软件公司，FLUENT 12 即是其推出的最新版本。

FLUENT 可以模拟和分析复杂几何区域内的流体流动与传热现象，它提供了灵活的网格特性，可以支持多种网格。用户可以自由选择使用非结构化或者结构化网格来划分复杂的几何区域，例如，对于二维问题可以使用三角形或四边形网格；对于三维问题可以使用四面体、六面体、棱锥、楔形或多面体网格；同时还支持混合网格。用户可以利用 FLUENT 提供的网格自适应特性，在求解过程中根据所获得的计算结果来优化网格。

FLUENT 以用户界面友好而著称，所以对初学者来说非常容易上手。FLUENT 的软件设计基于 CFD 软件群的思想，从用户需求角度出发，针对各种复杂流动的物理现象，采用不同的离散格式和数值方法，在特定领域内使计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳组合，从而高效率地解决各个领域的复杂流动计算问题。

FLUENT 的基本程序结构图如图 1-2 所示，一般包括以下几个部分。

- FLUENT：进行模拟计算的求解器。
- prePDF：用于模拟 PDF 燃烧过程。
- GAMBIT：建立几何模型及网格生成。
- Tgrid：用于从现有的边界网格生成体网格。
- Filters：转换其他程序生成的网格，用于 FLUENT 的计算。

可以接口的程序包括 ANSYS、I-DEAS、Nastran 和 Patran 等。

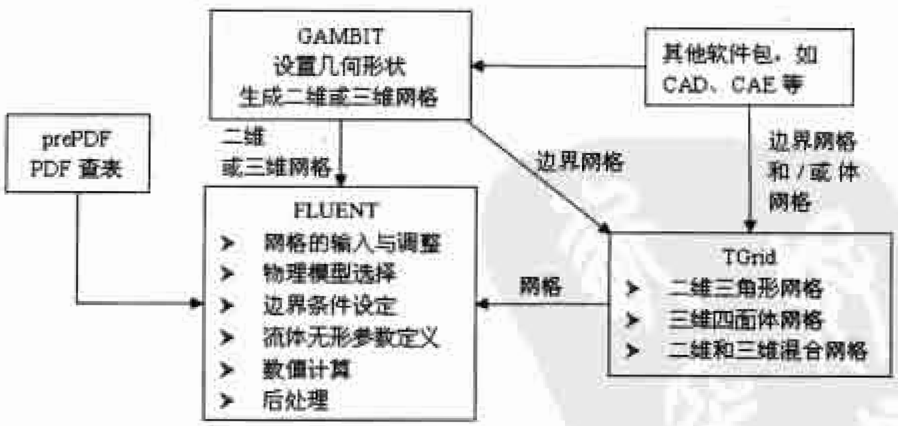


图 1-2 FLUENT 的基本程序结构图

1.2.1 FLUENT 的功能

FLUENT 12 的功能与特点如下。

- 完全非结构化网格：FLUENT 软件采用基于完全非结构化网格的有限体积法，而且具有基于网格节点和网格单元的梯度算法，网格类型较多，如图 1-3 所示。
- 改进的密度基计算器：在 FLUENT 6.3 基础上做了稳定性改进，采用密度基计算可压缩问题，较之前版本更为稳定。
- 定常/非定常流动模拟：可以模拟定常与非定常流动，且新增快速非定常模拟功能。
- 先进的动/变形网格技术：主要解决边界运动问题，用户只需指定初始网格和运动壁面

的边界条件，余下的网格变化完全由解算器自动生成。网格变形方式有 3 种，即弹簧压缩式、动态铺层式及局部网格重划式，其中，局部网格重划式是 FLUENT 所独有的，且用途广泛，可用于非结构网格、变形较大问题以及物体运动规律事先不知道而完全由流动所产生的力所决定的问题。FLUENT 解算器包括 NEKTON、FIDAP、POLYFLOW、ICEPAK 及 MIXSIM。

- 多网格支持功能：FLUENT 具有强大的网格支持功能，支持界面不连续的网格、混合网格、动/变形网格以及滑移网格等。需要强调的是，FLUENT 还拥有多种基于解的网格自适应、动态自适应技术以及动网格与网格动态自适应相结合的技术。
- 多种数值算法：FLUENT 采用有限体积法，提供了非耦合隐式算法、耦合显示算法、耦合隐式算法 3 种数值算法，是目前商用软件中最多的。
- 丰富先进的物理模型，包括如下几个方面。
  - 用户利用 FLUENT 可以精确地模拟无粘流、层流、湍流。湍流模型包括 Spalart-Allmaras 模型、k-ω 模型组、k-ε 模型组、雷诺应力模型、大涡模拟模型、最新的分离涡模拟模型及 V2F 模型等。另外，用户还可以根据需要自己定制或添加湍流模型。有关湍流模型的详细介绍见第 3 章。
  - FLUENT 提供了牛顿流体、非牛顿流体的数值计算模型。
  - 含有强制/自然/混合对流的热传导及固体/流体的热传导、辐射等模型。
  - 包含了多种化学反应及燃烧模型，可以完成化学组分的混合/反应计算。
  - 包含自由表面流模型、欧拉多相流模型、混合多相流模型、颗粒相模型、空穴两相流模型及湿蒸汽模型等。
  - 可以模拟熔化/凝固和蒸发/冷凝相变模型。
  - 提供了非均质渗透性、惯性阻抗、固体热传导和多孔介质模型。
  - 含有风扇、散热器及以热交换器为对象的集中参数模型。
  - 基于精细流场解算的预测流体噪声的声学模型。
  - 含有磁流体模块，可用于模拟电磁场和导电流体之间的相互作用问题。
  - 含有连续纤维模块，可用于模拟纤维和气体流动之间的动量、质量以及热交换问题。
- 其他独有的特点如下。
  - 可以方便地设置惯性或非惯性坐标系、复数基准坐标系、滑移网格以及动静翼相互作用模型化后的接续界面。
  - 内部集成丰富的物性参数数据库，含有大量的材料可供选用，此外，用户还可以方便地自定义材料。
  - 具有高效率的并行计算功能，提供多种自动/手动分区算法；内置 MPI 并行机制，可大幅提高并行效率。
  - 拥有友好的用户界面，并提供了二次开发接口（UDF）。
  - 含有后处理和数据输出功能，可对计算结果进行处理，生成可视化的图形及相应的曲线、报表等。

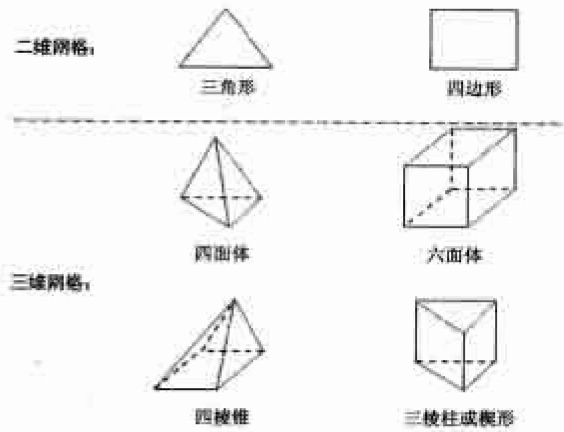


图 1-3　FLUENT 的网格形状

1.2.2　FLUENT 的操作界面

FLUENT 最初只支持 UNIX 操作系统，面向高端用户。随着 Windows 系统的普及，FLUENT 也开始支持 Windows 系统，但是其前处理软件 GAMBIT 仍然需要在 UNIX 类型的操作系统下才能正常运行，所以要在 Windows 系统下运行 GAMBIT 必须安装一个模拟 UNIX 环境的软件——Exceed。在 Windows 窗口中运行 FLUENT 的方法有如下 3 种：

◆ 直接利用桌面快捷方式，双击 FLUENT 图标，在弹出的 FLUENT Launcher 窗口中选择计算问题的维度、启动后的显示方式、是否并行计算等，设置完成后，单击 OK 按钮，即启动了 FLUENT 12，如图 1-4 所示。



图 1-4　FLUENT 直接启动图示

◆ 选择“开始”菜单中的“运行”命令，在“运行”窗口中输入“FLUENT”，按 Enter

键，弹出 FLUENT Launcher 窗口，其余同上。

◆ 选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 12→FLUENT Dynamics→FLUENT 命令，即弹出 FLUENT Launcher 窗口，其余同上。

FLUENT 的操作界面有两种：图形界面（GUI）和文本界面（TUI），用于控制包括菜单按钮的图形界面和终端仿真程序。

1. 图形界面

FLUENT 12 图形用户界面由操作面板、图形窗口、下拉菜单及对话框组成，如图 1-5 所示。刚启动 FLUENT 12 时，左侧显示操作面板，右上方显示图形窗口。当用户选择左侧操作面板的某选项时，具体的子选项列表会在中间的操作面板展开，这是与之前 FLUENT 版本不一样的地方。老版本的用户若不习惯这种 ANSYS 式操作方式，则可以利用菜单命令，如 Define 菜单。当用户执行 Results 命令时，图形窗口会出现相应的结果图像。此外，许多命令在执行过程中还会弹出对话框。

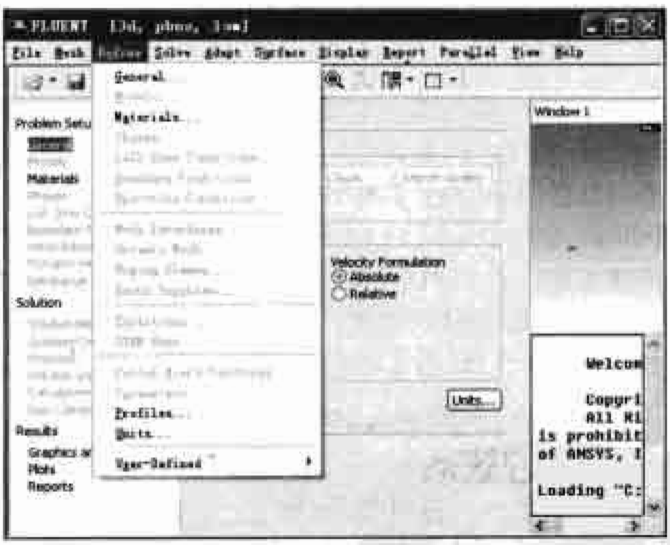


图 1-5　FLUENT 图形用户界面

FLUENT 12 菜单栏包含了 11 个菜单，如图 1-6 所示，是按运行的步骤顺序有层次地以菜单的方式组织在一起的。FLUENT 菜单提供了操作面板的大部分命令，其使用方法和 Windows 一样，直接选择即可弹出相应的面板或对话框，如选择 Display 菜单中的 Graphics and Animations 命令，则会展开如图 1-7 所示的 Graphics and Animations 面板。



图 1-6　FLUENT 的菜单栏

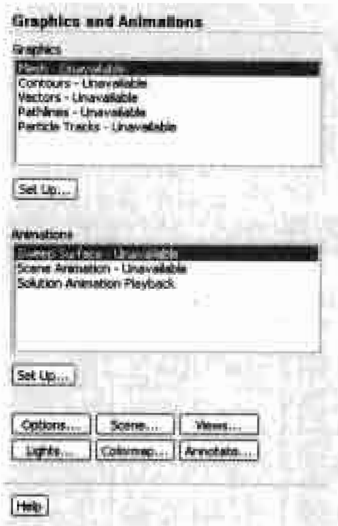


图 1-7　Graphics and Animations 面板

FLUENT 12 菜单栏下方是工具栏，如图 1-8 所示。用户可以利用其打开和保存文件、设置图形显示和视图窗口的形式。



图 1-8　工具栏

FLUENT 12 在操作中经常会弹出一类对话框，用于完成简单的输入/输出任务，如警告、错误和询问，如图 1-9 所示。此类对话框是临时窗口，出现时要对其进行响应。如信息提示框提示我们需要知道的信息，查看后单击 OK 按钮即可；而警告对话框用于警告某些潜在问题，并询问是否继续当前的操作。



（a）警告对话框　　（b）错误对话框　　（c）询问对话框

图 1-9　响应对话框

除了需要响应的对话框外，通常的对话框主要用于处理复杂的输入任务，该类对话框是一个独立的窗口，但是使用起来更像是填充一个表格。每一个对话框都是独一无二的，而且使用各种类型的输入控制组成表格。在对话框的控制下输入数据后，需要应用所改变的设置，或者取消所改变的设置。这种对话框有两个按钮，OK 按钮用于应用设置并关闭对话框；Cancel 按钮用于关闭对话框而不做任何改变，如图 1-10 所示。

若应用所改变的设置之后仍然不关闭对话框，可以做更多的设置。后处理和自适应网格中经常会出现这样的对话框，如图 1-11 所示。Apply 按钮表示应用设置不关闭对话框，该按钮经常也有其他的名称，如后处理过程中该按钮的名称是 Display，自适应网格中该按钮的名称是 Adapt。所有的对话框都包含 Help 按钮，用于显示如何使用对话框的信息。对话框中各种类型的输入控制如表 1-4 所示。

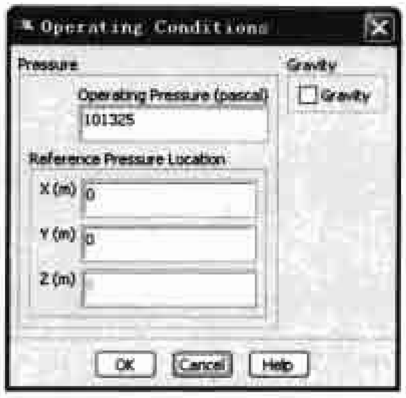


图 1-10　用于处理复杂任务的对话框

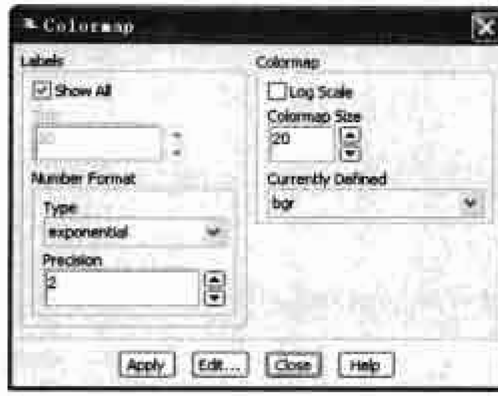
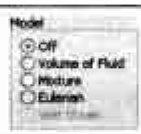
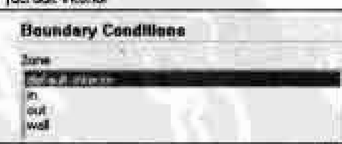
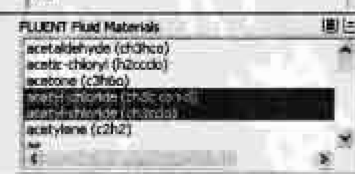
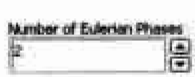


图 1-11　应用设置后不关闭的对话框

表 1-4　对话框中的各种类型的输入控制

输入控制	视图显示	输入控制	视图显示
按钮		数据输入框	
选择框		下拉列表框	
多选一框		单选列表框	
文本输入框		多选列表框	
微调框		标尺	

FLUENT 12 的右上角为图形窗口，如图 1-12 所示。后处理中，可通过 Contours 对话框来控制图形显示的属性，如图 1-13 所示。

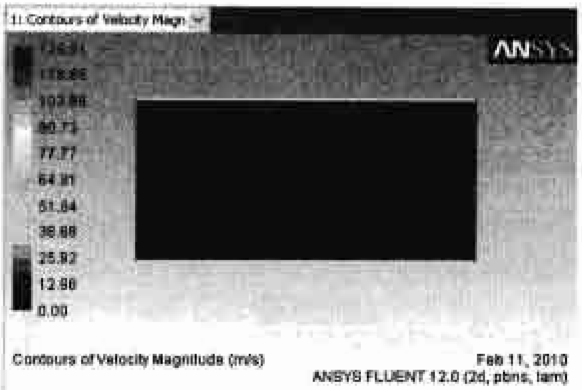


图 1-12　图形窗口

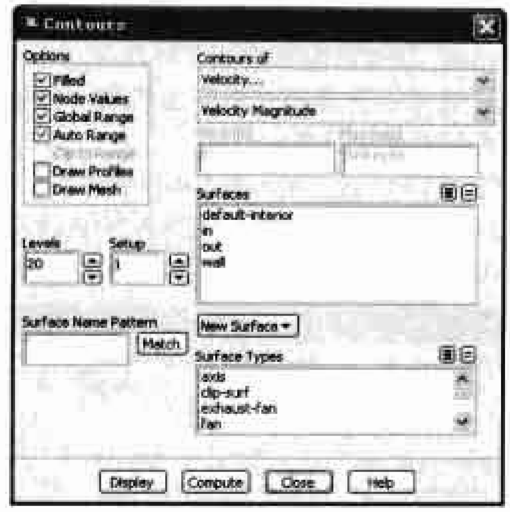


图 1-13　Contours 对话框

2. 文本界面

FLUENT 12 操作界面的右下角为文本界面，其中的命令行提示符位于最下面一行，刚启动 FLUENT 时，显示为“>”。用户可借助文本界面输入各种命令、数据和表达式。另外，FLUENT 12 也正是利用该界面显示文本信息的，从而达到用户与 FLUENT 交互的目的。需要说明的是，文本界面使用 Scheme 编程语言对用户输入的命令和表达式进行管理。Scheme 是 LISP 语言的一种，简单易学，尤其是其宏功能非常有用。用户可在命令行提示符后输入各种命令或 Scheme 表达式，直接按 Enter 键可显示当前菜单下的所有命令。如在根目录下直接按 Enter 键，则显示与菜单栏相对应的同名命令，如图 1-14 所示。在命令行提示符后，用户除了可以输入 FLUENT 命令外，还可以输入由 Scheme 函数组成的具有复杂功能的 Scheme 表达式，详细信息可参阅 FLUENT 用户手册。



图 1-14　文本界面

3. 图形控制及鼠标使用

执行 Graphics and Animations 和 Plots 的相关命令时可进行图形显示内容的选择和属性方面的设置。通过 Graphics and Animations 命令可显示压力、速度等物理量的云图（或等值线图）；通过选择 Display→Options 命令，在打开的 Display Options 对话框中可进行图形窗口显示属性的修改，如图 1-15 所示。通过 Color Scheme 下拉列表框可以改变视图窗口的背景，通过选中 Layout 栏中的复选框可以选择显示图题、坐标轴、标尺等，利用 Colormap Alignment 下拉列表框还可以改变云图标尺的位置。

右击图形窗口左上角，弹出的快捷菜单如图 1-16 所示，选择 Page Setup 命令可打开如图 1-17

所示的 Page Setup 对话框，用于设置图形输出的颜色和质量；Print 命令用于打印图形；Copy to Clipboard 命令则用于将当前视图窗口中的图形复制到剪贴板。要改变图形窗口的背景色或网格颜色，还可以直接在文本界面的命令行提示符后输入“display/set/colors”命令，然后输入要改变颜色的对象名称即可。

选择 Display→Mouse Buttons 命令，在打开的如图 1-18 所示的 Mouse Buttons 对话框中可调整鼠标按钮的定义。默认的鼠标按钮功能是：按住鼠标左键拖动可移动图形；按住鼠标中键拖动可缩放图形；按住鼠标右键拖动可执行用户预定义的操作。

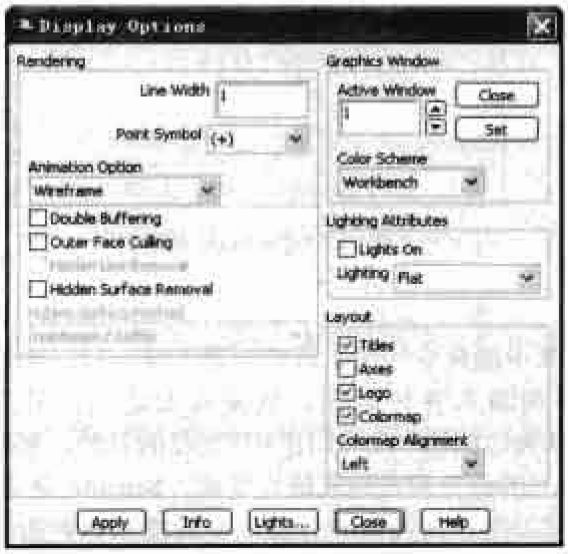


图 1-15 Display Options 对话框

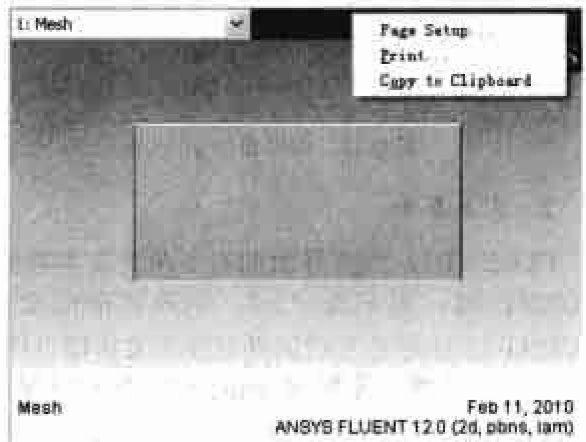


图 1-16 图形输出快捷菜单



图 1-17 Page Setup 对话框

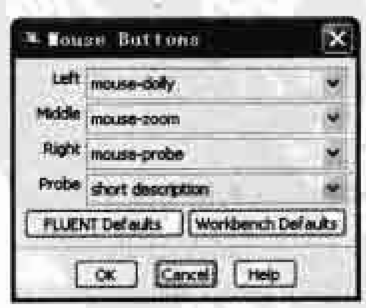


图 1-18 Mouse Buttons 对话框

1.2.3 FLUENT 的文件类型

FLUENT 的输入、输出文件类型较多，其中输入文件包括 grid、case、data、profile、

scheme 及 journal 文件，输出文件包括 case、data、profile、journal 及 transcript 文件。FLUENT 还可以保存面板的布局及图形窗口的硬拷贝，使用各种可视化及后处理工具还可以输出数据。FLUENT 中的主要文件类型如表 1-5 所示。

表 1-5 FLUENT 中的主要文件类型

文件名称	后缀名	文件内容
grid（网格文件）	.msh	包含所有节点的坐标及节点间的连接信息，不含边界条件、流动参数及求解参数
case（案例文件）	.cas	包括网格、边界条件、求解参数、流动参数、物性参数、用户界面和图形环境的信息
data（数据文件）	.dat	包含每个网格单元的流场值及收敛的历史记录（残差值）
profile（边界信息文件）	用户指定	指定边界区域上的流动条件，以及动边界的运动等条件
journal（日志文件）	用户指定	记录用户输入过的各种命令
transcript（副本文件）	用户指定	记录全部输入及输出信息
hardcopy（硬拷贝文件）	取决于输出格式	将图形窗口中的内容硬拷贝输出为 TIFF、PICT 和 BMP 等格式的图形文件
export（输出文件）	取决于输出格式	将数据输出到 AVS、DataExplorer、Ensight、FAST、FIELDVIEW、I-DEAS、NASTRAN、PATRAN 及 Tecplot 等第三方 CAD/CAE 软件
scheme（源文件）	.scm	定制 FLUENT 的界面，控制 FLUENT 的运行
interpolation（转接文件）	用户指定	不同网格求解时的转接文件，FLUENT 允许用户用两种网格方案求解同一问题，中间通过 Interpolation 文件交换数据
.fluent（配置文件）	.fluent	包含 Scheme 语言写成的语句，用于 FLUENT 进行定制和控制。FLUENT 启动时，要寻找该文件，若找到它，就加载
cxlayout（界面布局文件）	.cxlayout	保存当前对话框及图形窗口的布局

1.2.4 FLUENT 与其他软件的数据交换

FLUENT 12 可以调入其他软件的数据文件，用户只需选择主菜单中的 File→Import 命令，即打开可将数据文件导入 FLUENT 12 的其他软件列表，其中几乎包含了所有现有的有限元和有限体积法软件，如图 1-19 所示。CGNS、GAMBIT 和 PLOT3D 等软件主要提供网格文件，ABAQUS、CFX 和 PATRAN 等软件则可提供其自身计算的算例和结果文件，Tecplot 软件则可提供后处理过的结果文件。除了可以导入上述软件的数据文件外，FLUENT 12 也可将自身的算例和结果文件导出，与 FLUENT 6.3 版本不一样的是，FLUENT 12 中的 File→Export to CFD-Post 命令可以将计算结果导出给 ANSYS 12 自带的 CFD 后处理软件进行处理。用户可根据实际要求选择合适的软件与 FLUENT 12 进行数据交换。



图 1-19　可将数据导入 FLUENT 12 的软件列表

1.3　前处理简介

在 FLUENT 12 解算前，需要将模型网格导入，而 FLUENT 12 本身不具备划分网格的功能，所以需要借助其他前处理软件。现有的网格划分软件较多，其中以 GAMBIT 最为灵活方便，它是专业的 CFD 前处理软件，为功能强大的几何建模及网格划分工具，可以划分出包含边界层等特殊要求的高质量网格。另外，GAMBIT 还可以实现与 CAD 的衔接，处理复杂的几何模型，并能生成与多个 CFD 软件无缝转接的高质量网格。GAMBIT 网格划分方法的选择实现了完全智能化，当选择一个几何区域后，GAMBIT 会自动选择最合适的网格划分算法，使网格划分过程变得极为容易，其中专有的网格划分算法可以保证在较为复杂的几何区域中直接划分出高质量的六面体网格。

提示： 对于 Windows 操作系统，要运行 GAMBIT 软件，必须安装 HummingBird.Exceed 软件以完成 UNIX 系统的虚拟。

1.3.1　GAMBIT 的操作界面

GAMBIT 的操作界面分为菜单栏、视图窗口、命令显示窗口、命令输入窗口、命令解释窗口、操作面板和视图控制面板 7 个部分，如图 1-20 所示，下面分别进行介绍。

1. 菜单栏

菜单栏位于标题栏下方，包含文件、编辑、对象软件和帮助 4 个菜单项。如图 1-21 所示为“文件”菜单，可通过此菜单完成如下任务：



图 1-20 GAMBIT 操作界面



图 1-21 “文件”菜单

- New 和 Open 命令用于新建工程或打开已有工程，其识别的文件后缀名为.dbs。
- Save 和 Save As 命令用于和将当前工程保存或另存，保存后在工作目录下会生成 3 个文件，后缀名分别为.jou、.trn、.dbs。
- Print Graphics 用于将当前窗口的图形输出或打印。
- Run Journal 和 Clean Journal 分别用于运行和清除日志，后缀名为.jou。
- 通过 View File 命令可查看当前文件的相关信息。
- 通过 Import 命令可以导入其他软件生成的几何模型或网格，完成相关的数据交换，其子菜单如图 1-22 所示。若想将 AutoCAD 绘制好的图形导入 GAMBIT，则首先在 CAD 中完成图形的绘制，然后在命令面板中单击按钮，选择图形的轮廓线，右击或按 Enter 键，接着选择 File→Export 命令，选择保存类型为 ACIS（*.sat），输入合适的文件名，如 guan1.sat，再次选择图形的轮廓线，右击或按 Enter 键，打开 GAMBIT，选择 File→Import→ACIS 命令，在打开的对话框中输入文件名“guan1.sat”，或单击 Browse 按钮，在打开的对话框中选取文件，如图 1-23 所示。

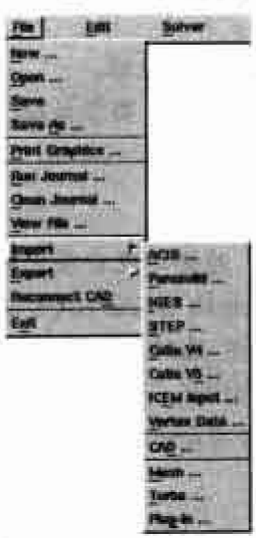


图 1-22 Import 子菜单

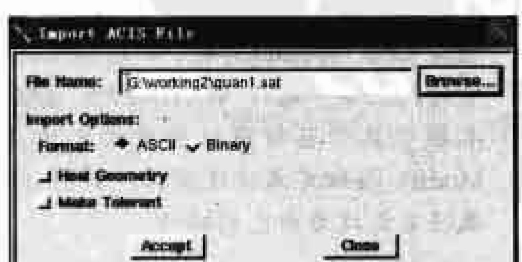


图 1-23 导入 ACIS 文件

◆ Export 用于导出当前模型与网格，其子菜单如图 1-24 所示，对于 FLUENT 而言，需要将 GAMBIT 建立好的模型及网格导出为后缀名为.msh 的文件。

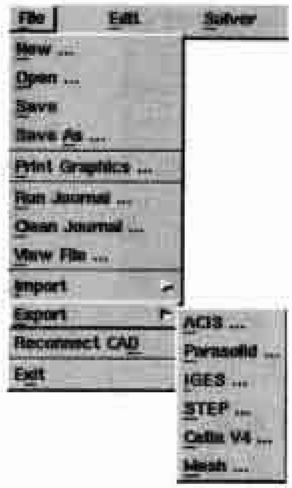


图 1-24　Export 子菜单

◆ 通过 Reconnect CAD 命令可实现重新与 CAD 建立连接。
◆ Exit 命令用于退出当前工程。

"编辑"菜单如图 1-25 所示，通过此菜单可以完成如下任务：



图 1-25　"编辑"菜单

◆ 通过 Title 命令可以定义工程标题，即命名当前工程名称。
◆ 通过 File 命令可实现文件信息的编辑，如设置文件名、编者信息等。
◆ 通过 Parameters 命令可进行参数设置，可设置相关参数的名称、类型及赋值。
◆ 通过 Defaults 命令可以查找或修改默认的环境设置。
◆ Undo 和 Redo 分别用于撤销和恢复当前操作。

提示：有时用户希望 GAMBIT 视图窗口的背景色变为白色，若想实现背景色的改变，可以选择 Edit→Defaults 命令，弹出 Edit Defaults 对话框，选择 GRAPHICS 选项卡，从其中的列表框中选择 WINDOWS BACKGROUND COLOR 选项，其右下方的 Value 文本框中显示当前窗口的背景色为 black，此时删除 black 而输入"white"，单击 Modify 按钮完成修改操作，如图 1-26 所示，最后单击 Close 按钮关闭对话框，即完成将背景改为白色的操作。

如图 1-27 所示为"对象软件"菜单，GAMBIT 可为 FLUENT、ANSYS 和 POLYFLOW 等主流数值模拟软件建立模型与网格。在建模前可以首先选择要连接使用的接口软件，使工程处

理更具针对性。

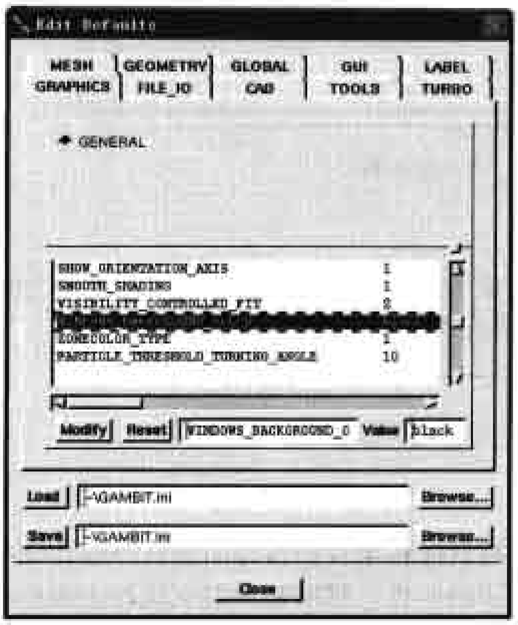


图 1-26　Edit Defaults 对话框

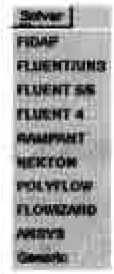


图 1-27　“对象软件”菜单

2. 视图窗口

GAMBIT 可以显示 4 个视图窗口，如图 1-28 所示，通过拖拉图中的十字按钮，可以完成各个窗口的缩放，若将十字按钮移至左上、左下、右上或右下 4 个角，即可恢复到如图 1-20 所示的视图窗口。在实际建模过程中，用户可根据需要选择单视图或多视图窗口显示。

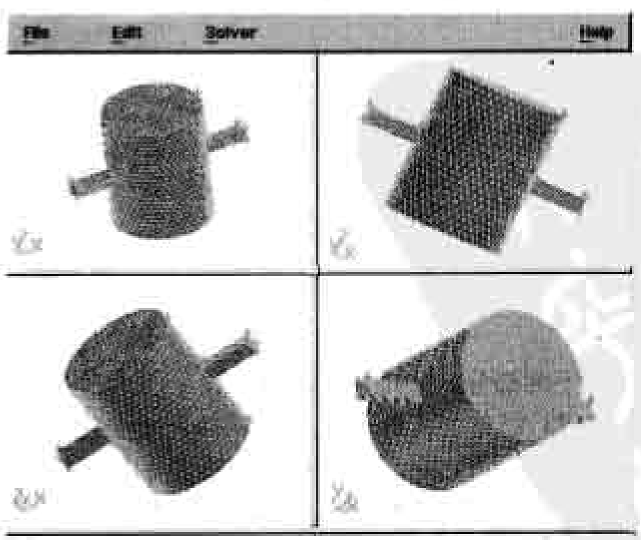


图 1-28　四视图显示

3. 命令显示窗口

命令显示窗口位于视图窗口的左下方，如图 1-29 所示。从该窗口中可以及时查看每一步操

作的命令及结果，帮助用户明确已执行的操作并及时发现存在的问题。



图 1-29　命令显示窗口

4. **命令输入窗口**

如图 1-30 所示为命令输入窗口，该窗口位于整个 GUI 窗口的最下方，在 Command 文本输入框中，用户可以输入相关命令，以实现相应的操作。



图 1-30　命令输入窗口

5. **命令解释窗口**

命令解释窗口位于视图窗口的右下角，将鼠标移至视图窗口右侧任一操作面板或视图控制面板的按钮上，该窗口中都会实时出现该按钮的解释，帮助初学者认识相关操作按钮的功能，如图 1-31 所示。

6. **操作面板**

操作面板是 GAMBIT 的核心部分，通过该面板上的图标按钮，可以完成绝大部分的建模和网格划分工作，如图 1-32 所示。面板的前 3 个按钮反映了 GAMBIT 的整个操作过程，首先是建立模型，然后是网格划分，最后是定义边界条件类型，关于这 3 个按钮的详细功能介绍见本书第 2 讲。第 4 个按钮用来定义视图中的坐标系统，一般采用默认的设置。

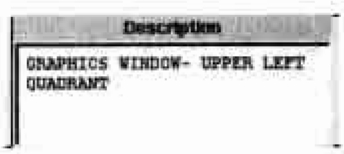


图 1-31　命令解释窗口

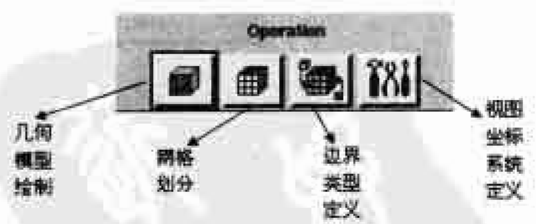


图 1-32　操作面板

7. **视图控制面板**

视图控制面板分为上、下两部分，如图 1-33 所示。上面一排图标是视图显示与否的控制按钮，前 4 个分别代表了图 1-28 中左上、右上、左下、右下 4 个视图，All 即表示激活全部 4 个视图。当激活相应的视图图标时，下方的 10 个控制按钮才会作用于该视图。其中，为全图显示按钮，可将视图窗口中的图形缩放至全窗口显示；为视图显示按钮，可以选择不同的四视图或单视图显示；为坐标系统按钮，方便用户选择模型的方位坐标；为显示项目控制按钮，可指定模型是否可见；则为外观显示按钮，用于指定模型的外观显示，包括线框方式、渲染方式和消隐方式等。

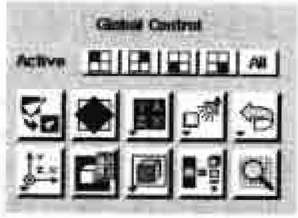


图 1-33 视图控制面板

1.3.2 网格生成方法

FLUENT 可以导入进行后续计算的网格有二维的三角形和四边形网格，三维的四面体网格、六面体网格、金字塔型网格、楔型网格，以及由上述网格类型构成的混合型网格。按其生成方法可分为 3 大类，即结构化网格、非结构化网格和结合两者优势的混合网格。如图 1-34 所示为结构化网格划分技术、非结构化网格划分技术与混合网格划分技术对同一模型的网格划分情况，可以清晰地看到 3 种方法划分后的不同网格形态。



图 1-34 不同形式的网格

1. 结构化网格

较早的网格划分方法主要为结构化网格。从严格意义上讲，结构化网格是指网格区域内所有的内部节点都具有相同的毗邻单元，即网格体系中节点排列有序、相邻节点间的关系明确。结构化网格可以用直角坐标系或圆柱（球）坐标系下的坐标值表示出其网格的位置及大小。其优点主要体现为：网格生成的速度快、质量好，容易实现区域的边界拟合，适于流体和表面应力集中等方面的计算，且数据结构简单，对曲面或空间的拟合大多采用参化或样条插值的方法得到，区域光滑，与实际的模型更接近。

现有的结构化网格生成方法基本上可分为代数生成方法、保角变换方法、偏微分方程方法和变分原理方法 4 大类。

2. 非结构化网格

为了弥补结构化网格不能够解决任意形状和任意连通区域的网格划分的不足，20 世纪 60 年代末，人们提出了采用非结构化网格的技术手段，现已成为研究的热点之一。与结构化网格不同的是，非结构化网格是指网格区域内的内部点不具有相同的毗邻单元，即与网格划分区域内的不同内点相连的网格数目不同，网格单元和节点彼此没有固定的规律可循，其节点分布完全是任意的。从定义上可以看出，结构化网格和非结构化网格有相互重叠的部分，即非结构化网格中可能会包含有结构化网格的部分。

非结构化网格划分技术假设任何空间区域都可以被四面体（三维）或三角形（二维）单元所填满，即任何空间区域都可以被四面体或三角形为单元的网格所划分。它有两种类型：宏观非结构化网格和微观非结构化网格。宏观非结构化网格是先将空间区域划分成许多小块，每个小块用结构化网格划分，再将每个小块网格用非结构化网格连接，合并成整体的网格。它在一定程度上可以解决复杂边界问题，但块网格拓扑的形成往往需要大量的人工处理，因而不易形成工程实际所需的通用程序，且这种网格由于自适应处理，常容易导致网格结构性的彻底破坏，因而也不适合于网格自适应。微观非结构化网格是完全没有规律的、自由生成的网格，是一种任意的网格。

非结构化网格适合于复杂区域的网格划分，特别对奇性点的处理很简单，生成过程无须求解任何方程，其随机的数据结构更易于作网格自适应，以便更好地捕获流场的物理特性。根据应用的领域，非结构化网格技术可以分为应用于差分法的网格生成技术（grid generation technology）和应用于有限元方法中的网格生成技术（mesh generation technology）。从生成网格的方法来区分，非结构化网格生成技术还可以分为四叉树（八叉树）方法、Delaunay 方法和阵面推进方法。

3. 混合网格

为克服结构化网格和非结构化网格各自的缺点，混合网格技术应运而生，它结合了结构化网格和非结构化网格的优点，已越来越受到重视，其可分为针对多部件或多体复杂外形的混合网格、针对黏性计算的混合网格和矩形与非结构混合网格 3 种。

1.4 后处理简介

为得到形象直观的图形结果，模拟计算完成后还需进行后处理，FLUENT 本身具备一定的后处理功能及图形可视化技术，能够显示相关物理参数的云图、等值线图、速度矢量图和流动轨迹图等，同时还能求得力、力矩及对应的力矩系数、流量等，并生成简要的计算报告。除了利用 FLUENT 进行后处理外，用户还可以借助 Tecplot 软件进行流动后处理分析，Tecplot 是一个功能强大的科学绘图软件，不仅可以绘制二维图形和函数曲线，还可以进行三维面和体的绘图，提供了多种图形格式，且界面友好、易学易用。

1.4.1 FLUENT 的后处理功能

FLUENT 自身的后处理能力主要体现在图形可视化技术与文字报告上，图形及可视化技术主要是将流场分布以云图、等值线图和矢量图等形式呈现出来，通过这些图形的显示可以帮助用户分析流场的变化及相关物理参数的分布。除了形象直观的云图、矢量图显示之外，相关变量的坐标曲线图也可以显示。FLUENT 还提供了很多数据显示与文字报告的工具，用户利用这些工具可以得到边界流量、作用力、投影面积、面积分与体积分等。

FLUENT 后处理操作均在操作面板的 Results 选项下，Results 选项包含 Graphics and Animations（可视化图形）、Plots（曲线图）和 Reports（文字报告）3 项，每项可进行的后处理操作如图 1-35~图 1-37 所示。Graphics and Animations 主要用于显示网格、云图、矢量图、迹线和颗粒轨迹，Plots 主要用于显示散点图、柱状图及 FFT，Reports 则可得到流量、作用力、投影面积、面积分与体积分、离散相的采样情况和结果及热交换量等。

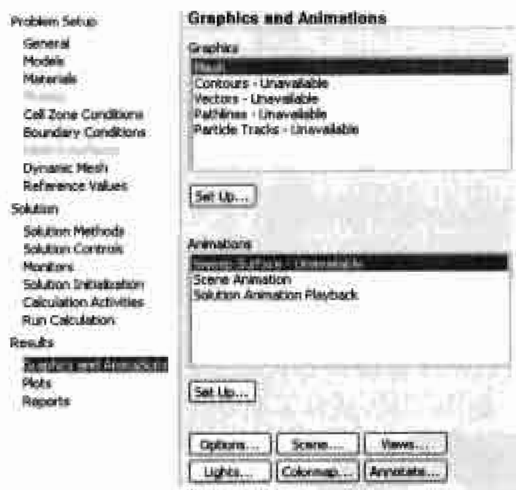


图 1-35 Graphics and Animations 面板



图 1-36 Plots 面板

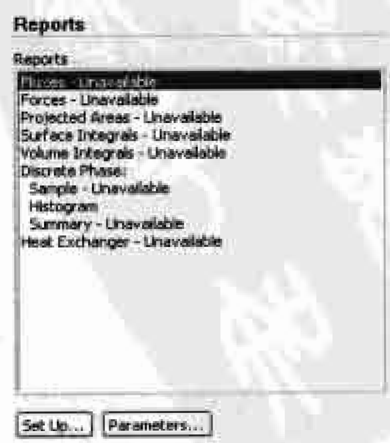


图 1-37 Reports 面板

1.4.2 Tecplot 界面及后处理功能

Tecplot 是一款功能强大的科学绘图软件，提供了多种图形格式，有针对 FLUENT 软件的专用数据接口，可以直接读入算例文件和数据文件，也可以在 FLUENT 软件中选择面和变量输出 Tecplot 格式的文档，再导入到 Tecplot 中进行处理。

Tecplot 界面友好，有菜单栏、工具栏、状态栏和工作区 4 部分，如图 1-38 所示。

菜单栏与一般的 Windows 程序类似，可以帮助用户完成绝大多数 Tecplot 的功能，如图 1-39 所示。



图 1-38 Tecplot 界面

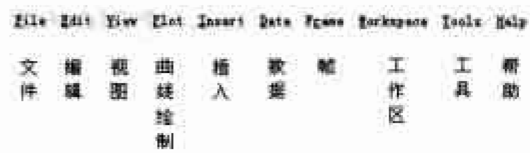


图 1-39 Tecplot 的菜单栏

工具栏中有 Tecplot 常用的画图控制按钮，可以进行常用的画图控制，另外，还可以控制帧的模式、活动帧和快照模式，如图 1-40 所示，包括帧模式、区域/图层、区域效果、重画按钮和工具按钮等部分。



图 1-40 Tecplot 的工具栏

状态栏位于窗口底部，在鼠标指针移动过工具栏时会给出帮助提示，如图 1-41 所示。可以通过选择 File→Preferences 命令，在打开的子菜单中选择相应命令对状态栏的颜色、大小等进行设定，如图 1-42 所示。



图 1-41　Tecplot 的状态栏



图 1-42　Preference 列表

工作区用于绘制和创建图形，在默认的情况下，Tecplot 同时显示网格和标尺，如图 1-43 所示，所有的操作都是在当前帧完成的。

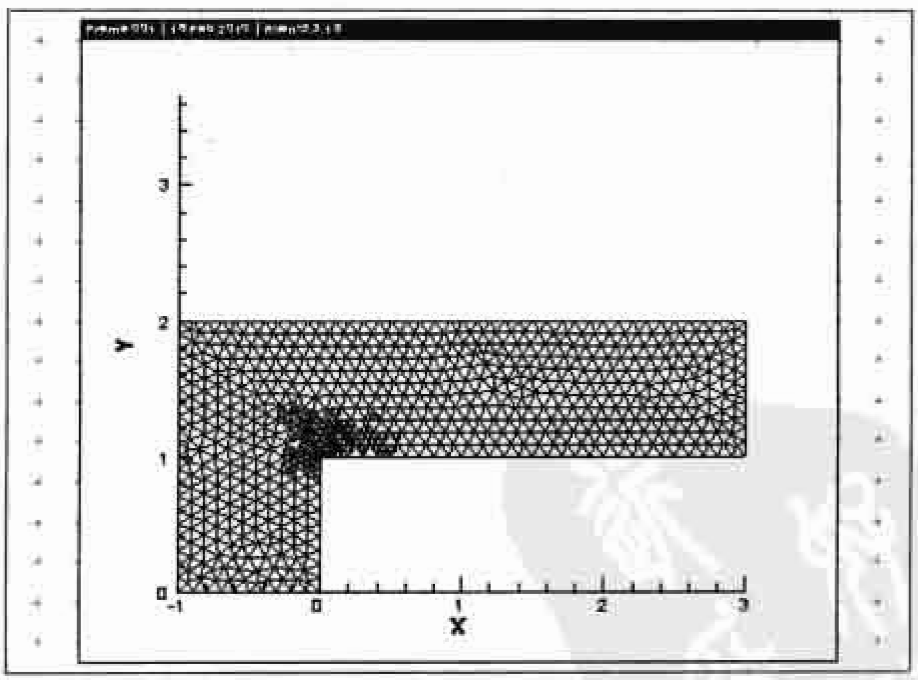


图 1-43　Tecplot 的工作区

1.5　FLUENT 模型简介

在 FLUENT 12 操作面板 Problem Setup 选项下的 Models 子选项中包括了大部分可调用模型，如多相流模型、传热模型、湍流模型、组分输运模型和离散相模型等，如图 1-44 所示。

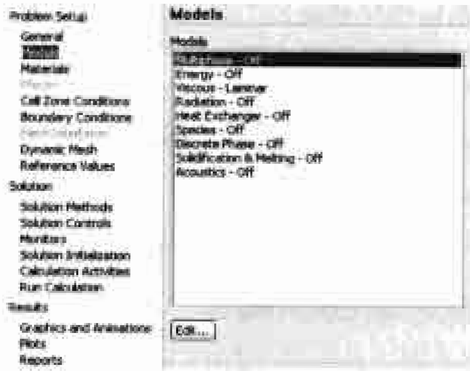


图 1-44 FLUENT 模型

1.5.1 湍流模型

湍流中的脉动现象对工程设计有直接影响，一般认为，无论湍流运动多么复杂，非稳态的连续性方程和 N-S 方程对于湍流的瞬时运动都仍然适用。在连续性方程和 N-S 方程的基础上，人们不断引入新的算法，逐步发展成了多个湍流模型，总结起来主要有以下 3 类：

- 湍流输运系数模型，即将速度脉动的二阶关联量表示成平均速度梯度与湍流粘性系数的乘积，模型的任务就是给出计算湍流粘性系数的方法。根据建立模型所需要的微分方程的个数，分为零方程模型、单方程模型和双方程模型。
- 直接建立湍流应力和其他二阶关联量的输运方程。
- 把湍流分成大尺度湍流和小尺度湍流，通过求解三维经过修正的 N-S 方程，得到大涡旋的运动特征，而小涡旋运动则采用上述以湍流的统计结构为基础对所有涡进行统计平均的模型，这种模型称为大涡模拟。

FLUENT 12 提供的湍流模型如图 1-45 所示，实际求解中，应根据具体问题的湍流特点来决定，选择的原则是“精度高、省时、简单通用”。湍流模型的详细介绍见第 3 讲。

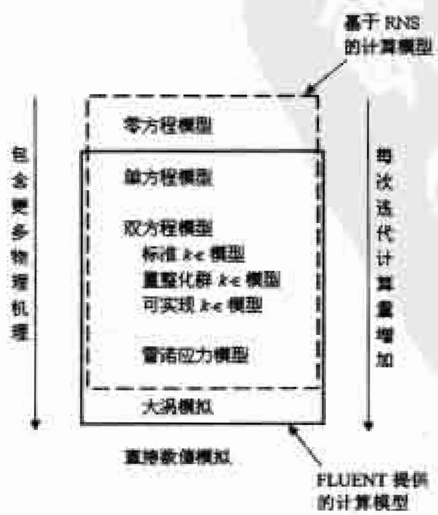


图 1-45 湍流模型

1.5.2 非定常模型

实际工程中，绝大部分的流动问题都是非定常流动，如开关输液管路阀门的过程、水泵泵吸过程、空调房的降温过程、闸门放水过程、溃坝过程、圆柱绕流的漩涡脱落过程、水面波浪问题及具有周期性的流动过程等。非定常流动的运动要素时刻变化，因此研究起来有很大的难度。在 FLUENT 12 操作面板 Problem Setup 选项下方的 General 子选项所对应的面板中，通过选择 Solver 栏中的 Time 为 Steady 或 Transient 以实现定常模型或非定常模型的调用，如图 1-46 所示。

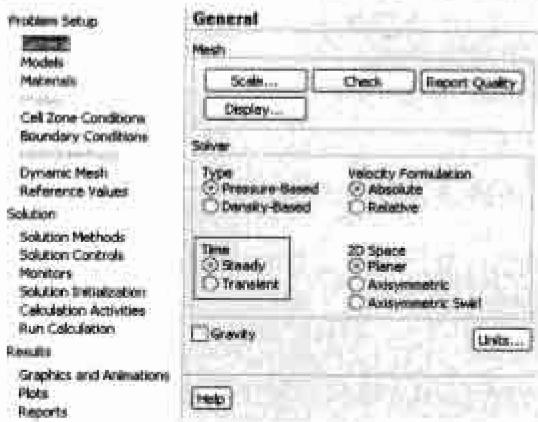


图 1-46　General 面板

非定常流动在迭代计算时，需要设置时间步长（Time Step Size）、时间步数（Number of Time Steps）及一个时间步所占用的最大迭代次数（Max Iterations per Time Step），这 3 个参数均需根据实际问题具体设置，其中时间步长不宜过大，时间步数乘以时间步长为一次迭代计算问题所经过的时间，而一个时间步所占用的最大迭代次数关系到问题的收敛性。读者在计算时，要合理设置时间步长与时间步数，及时观察流动要素的变化，以免错过流动要素变化曲线的转折点；另外，一个时间步所占用的最大迭代次数要适中，尽可能地加快问题的收敛速度，具体设置内容见第 4 讲。

1.5.3 传热模型

热传递过程是一种复杂的物理现象，除了遵循热力学第一定律和第二定律外，还有其特殊的规律。通常，按其物理本质的不同，可以把它分为热传导、热对流和热辐射 3 种基本方式。在静止的液体中发生的热传递也主要取决于导热，而在流动的液体及流动或静止不流动的气体中，热传递主要靠对流或热辐射。

激活传热计算模型需要在操作面板中展开 Problem Setup→Models 选项，在 Models 面板中选择 Energy-Off 选项，单击 Edit 按钮，打开 Energy 对话框，选中 Energy Equation 复选框，如图 1-47 所示。

FLUENT 12 中可以用 5 种模型来计算辐射换热问题，分别为离散换热辐射模型（DTRM）、P1 辐射模型、Rosseland 辐射模型、表面辐射模型（S2S）和离散坐标辐射模型（DO），如图 1-48 所示。

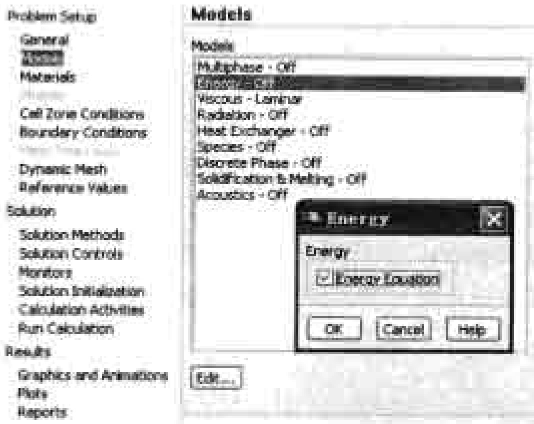


图 1-47　激活传热模型

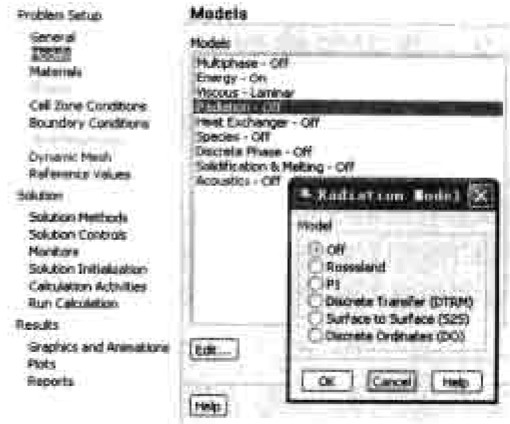


图 1-48　辐射模型

除了调用传热模型外，还需设置流动入口、出口和壁面上的热边界条件及流动材料的热物理参数，相关设置内容见第 5 讲。

1.5.4　多相流模型

物质具有气态、液态、固态三相，自然界和工程中很多问题都涉及多相流动。多相流可以分为气液流动、气固流动、液液流动、液固流动及三相流动。如空气泵、气穴、蒸发的气泡流、喷雾、干燥机、气冷的液滴流、旋风分离器的粒子负载流等都属于多相流动。FLUENT 12 的多相流模型主要包括 VOF（Volume of Fluid）模型、Mixture 模型和 Eulerian 模型，如图 1-49 所示。

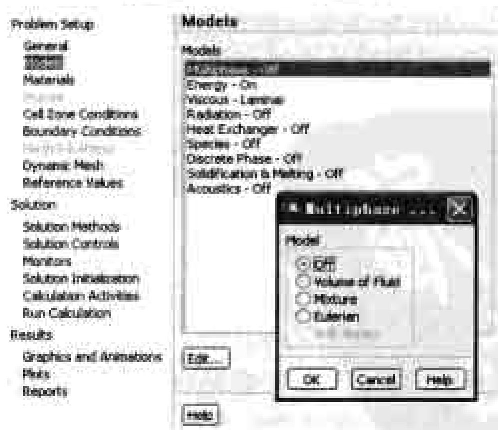


图 1-49　多相流模型选择

VOF 模型是一种在固定的欧拉网格下的表面跟踪方法，通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的体积分数来模拟两种或 3 种不能混合的流体。当需要得到一种或多种互不相融流体间的交界面时，可以采用这种模型。典型的应用例子包括分层流、射流破碎、流体中的大泡运动和自由表面流动等。

混合模型（Mixture 模型）是一种简化的多相流模型，可用于模拟两相或多相具有不同速度的流动（流体或颗粒）。混合模型通过求解混合相的连续性、动量和能量方程，第二相的体积分数方程以及相对速度的代数方程来实现。典型的应用包括低质量载荷的粒子负载流、气泡流及

旋风分离器等。混合模型也可以用于没有离散相相对速度的均匀多相流。

欧拉模型可以模拟多相流动及相间的相互作用。相可以是气体、液体、固体的任意组合。每一相都采用 Eulerian 处理。采用欧拉模型时，第二相的数量仅仅因为内存要求和收敛行为而受到限制，只要有足够的内存，任意多个第二相都可以模拟。然而，对于复杂的多相流流动，其解会受到收敛性的限制。

具体的多相流模型使用步骤见第 6 讲。

1.5.5 离散相模型

除了多相流模型，FLUENT 12 还可以在拉氏坐标下模拟流场中的离散相，计算这些离散颗粒的轨道及由颗粒引起的热量和质量传递。应用离散相模型，FLUENT 可以模拟各种涉及离散相的问题，如颗粒分离与分级、喷雾干燥、气溶胶扩散过程、液体中气泡搅浑、液体燃料的燃烧及粉煤燃烧等。

FLUENT 中的离散相模型假定第二相非常稀薄，因而颗粒-颗粒之间的相互作用、颗粒体积分数对连续相的影响均未加以考虑。这种假定意味着分散相的体积分数必然很低，一般来说要小于 10%~12%，但颗粒质量承载率可以大于 10%~12%，即用户可以模拟分散相质量流率大于连续相的流动。

在 Models 面板中选择 Discrete Phase-Off 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 1-50 所示的 Discrete Phase Model 对话框，即可供用户进行离散相模型的设置，具体操作见第 7 讲。

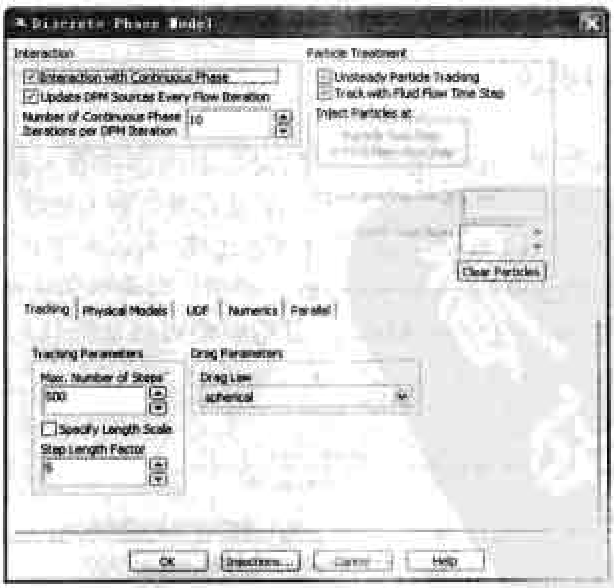


图 1-50 Discrete Phase Model 对话框

1.5.6 组分输运与化学反应模型

FLUENT 12 强大的化学反应模拟能力能够模拟各种复杂的燃烧与化学反应过程，多年来帮助工程师们解决了多个工程实际难题，如 No_x 和其他污染形成的气相反应、固体壁面发生的表

面反应和粒子表面反应等。在实际工程中，经常遇到有组分输运与化学反应的问题，最常见的化学反应是燃烧。燃烧按照参与反应的流体可以分为单相和多相燃烧，按照反应前后各组分的分布可以分为预混燃烧、扩散燃烧和部分预混燃烧，按照燃烧的状态可以分为稳态燃烧和非稳态燃烧；按照反应时间和扩散时间的关系可以分为快速反应和有限反应。在湍流燃烧中，反应速率和流动是相互耦合的，燃烧速率除了取决于化学动力学外，还取决于流场。

FLUENT 12 针对不同的组分输运与化学反应问题具有相应的解算模型，包括通用有限速率模型、非预混燃烧模型、预混燃烧模型、部分预混燃烧模型及 PDF 输运方程模型，如图 1-51 所示，具体操作见第 8 讲。

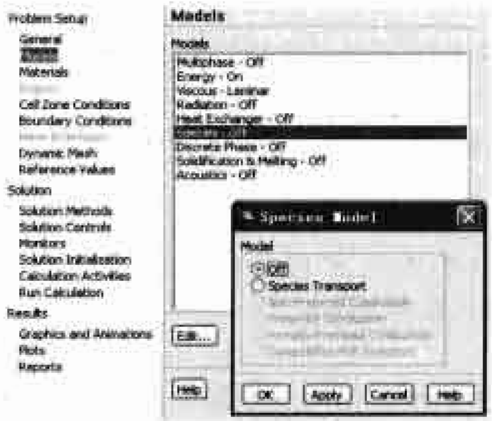


图 1-51　Species Model 对话框

1.5.7　凝固与融化模型

实际生活中经常出现凝固与融化现象，工程实际中也存在着大量的与凝固和融化相关的问题，如冬天水结冰、油库的油凝结等，这类问题涉及相变，FLUENT 为此提供了凝固与融化模型，用户只需在操作面板中 Problem Setup 选项下方选择 Models 子选项，在打开的 Models 面板中选择 Solidification & Melting-Off 选项，单击 Edit 按钮，即可弹出如图 1-52 所示的 Solidification and Melting 对话框，选中 Solidification/Melting 复选框即可启动凝固与融化模型。

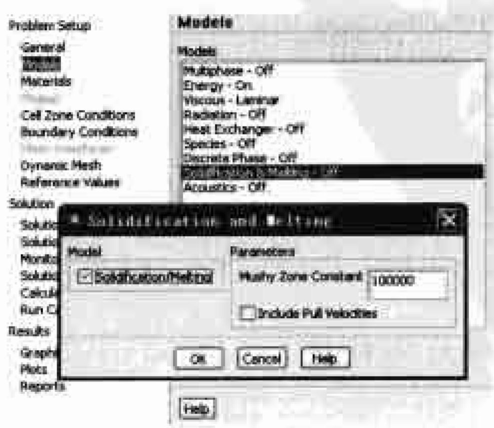


图 1-52　凝固与融化模型对话框

1.5.8 动网格模型

单一物体运动或旋转时，可以采用坐标变换的方法来简化问题。然而，当多个物体之间存在相对旋转时，简单的转换参考坐标系已不能解决问题，如涡轮发动机、叶轮机械中静子和转子的干扰问题等，无论怎么设置参考系，都会遇到固体边界随时间变化的问题。这类问题可以利用 FLUENT 中相关的动网格模型来解决。

动网格模型主要用于模拟由于流域边界运动引起流域形状随时间变化的流动情况。流动既可以是明确的运动（如具有明确的线速度或角速度），也可以是未知的运动（其绕物体重心的线速度或角速度是由流域中固体上的受力平衡得出的），下一时间步的运动情况是由当前时间步的计算结果确定的。在计算之前要先定义体网格的初始状态，在边界发生运动或变形后，其流域的网格重新划分是在 FLUENT 内部自动完成的，而边界的形变和运动过程可以用边界型函数来定义，也可以用 UDF 函数来定义（具体内容参见第 10 讲）。动网格模型求解的是非定常问题，需要消耗较大的硬件资源。动网格模型的调用可选择 Problem Setup 选项下方的 Dynamic Mesh 选项，如图 1-53 所示，其具体设置参见第 9 讲。

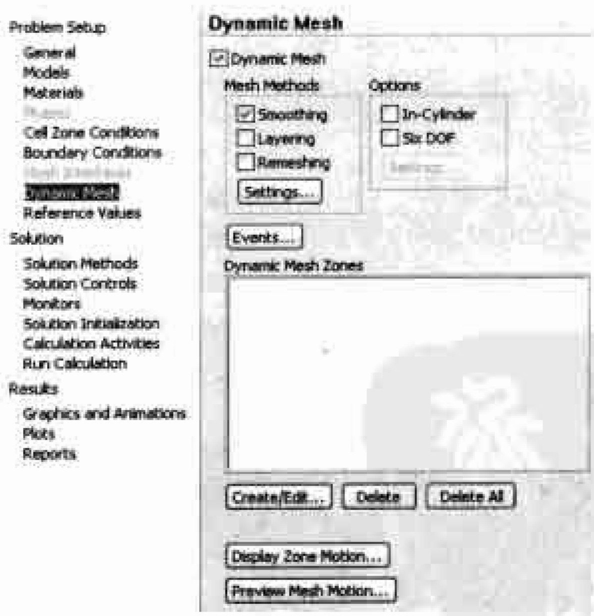


图 1-53　Dynamic Mesh 面板

第2讲　前处理网格生成

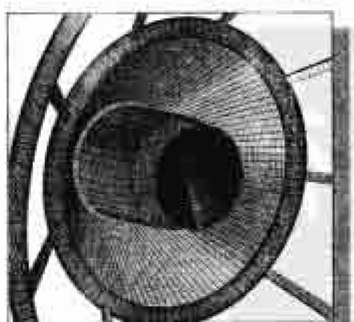
GAMBIT是面向CFD的专业前处理软件，是功能强大且灵活方便的几何建模及网格划分工具，可以直接进行点、线、面、体的模型建立及边界层、线、面、体的网格划分，也可以实现与CAD的衔接，处理复杂的几何模型，并能生成与多个CFD软件无缝转接的高质量网格。其网格划分方法的选择实现了完全智能化，当选择一个几何区域后，GAMBIT会自动选择最合适的网格划分算法，使网格划分过程变得极为容易，其中专有的网格划分算法可以保证在较为复杂的几何区域中直接划分出高质量的六面体网格。

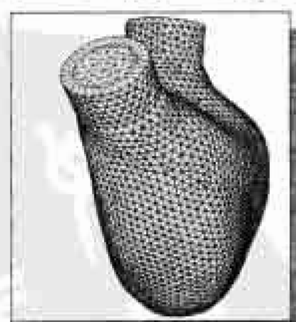
在实际仿真计算工作中，大约有80%的时间是花在网格划分上的，可以说网格划分能力的高低是决定工作效率的主要因素之一。因此，本讲主要介绍GAMBIT的建模及划分网格的功能，通过系列性实例的讲解，帮助读者了解GAMBIT的操作步骤并掌握实际模型的建立与网格的划分。

本讲内容

- 实例·模仿——二维偏心圆环
- GAMBIT几何建模
- GAMBIT网格划分
- GAMBIT边界与介质类型定义
- 实例·操作——三维圆柱体
- 实例·练习——三维同心环空柱体

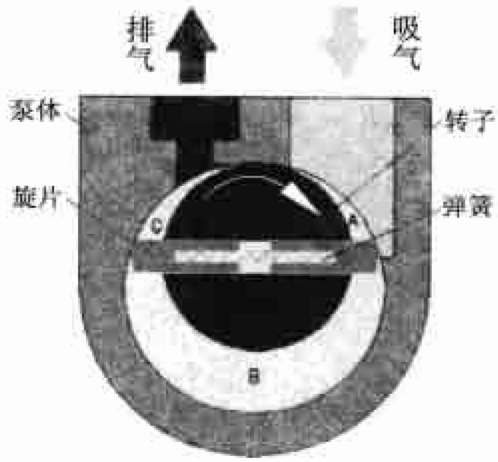






2.1　实例·模仿——二维偏心圆环

偏心圆环在管道、井筒、往复泵和轴承中经常出现，如图2-1所示。流体在偏心圆环中会呈现怎样的流动状态及其速度、压强、温度分布如何，都是设计管道、泵、轴承结构与尺寸的关键参数。而仿真计算前，需要建立偏心圆环的模型并划分网格，因此，下面首先介绍利用GAMBIT进行二维偏心圆环数模的前处理过程，圆环尺寸如图2-2所示。



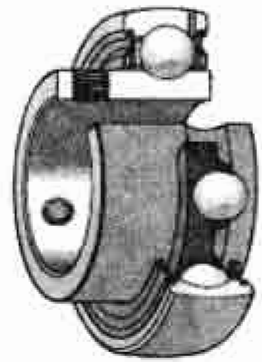


图 2-1　泵、轴承中的偏心环空

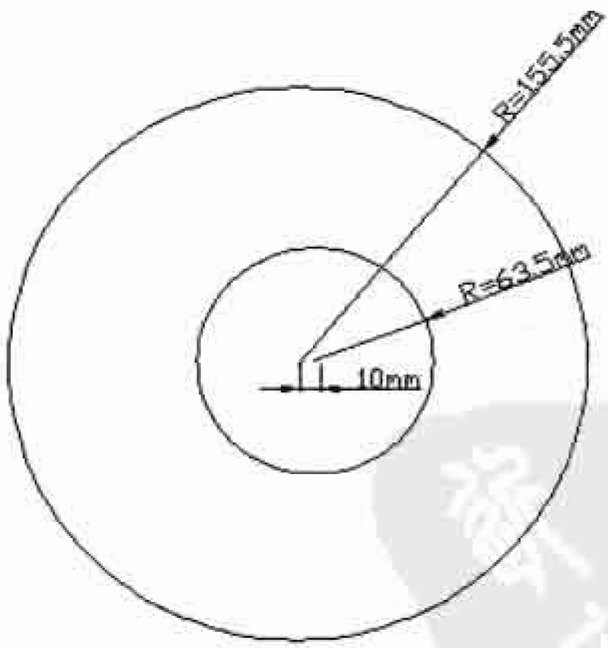


图 2-2　偏心圆环几何尺寸

【思路分析】

偏心圆环由大、小两个圆构成，可先在同一圆心绘制出半径大小不一的两个圆，然后利用移动命令将内圆向右移动 10mm（偏心距），再利用布尔减命令，将大圆减去小圆，得到需要的几何模型。几何模型建立好之后，采用结构网格（四边形）进行网格划分，在两圆间建立径向辅助线，对辅助线、圆弧分别进行线网格划分（这里需要注意内外圆弧的线网格段数应对应相等）。线网格划分好后，即可生成面网格。最后，定义圆环的边界类型。模型建立及网格划分流程如图 2-3 所示。

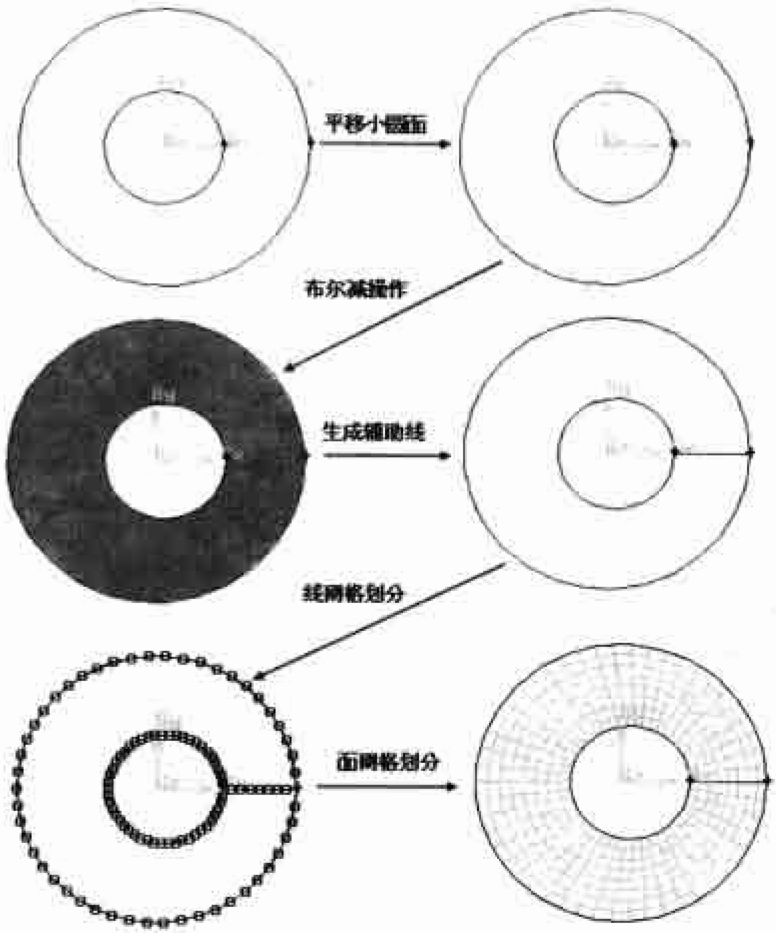


图 2-3　偏心环空建模及网格划分流程图

【光盘文件】

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch2\2-1.msh 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch2\2-1.avi 文件。

【操作步骤】

（1）选择菜单栏中的 File→New 命令，弹出 Create New Session 对话框，如图 2-4 所示。在 ID 和 Title 文本输入框中输入“2-1”，取消选中 Save current session 复选框（若选中，其左侧按钮将显示为红色），单击 Accept 按钮。

（2）单击操作面板中的按钮，弹出几何建模工具面板，如图 2-5 所示。

（3）单击几何建模面板中的按钮，弹出 Face 工具面板，如图 2-6 所示。

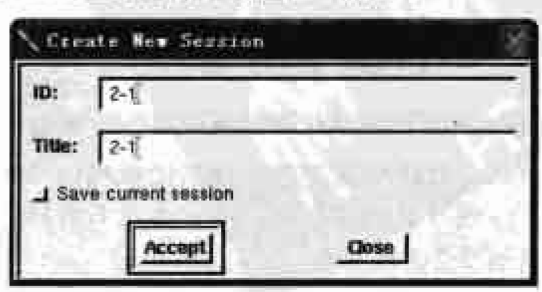


图 2-4　Create New Session 对话框



图 2-5 几何建模工具面板

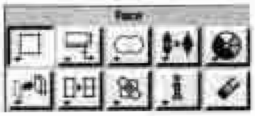


图 2-6 Face 工具面板

（4）单击 Face 面板上排第二个按钮，默认弹出矩形面域的绘制面板，如图 2-7 所示。

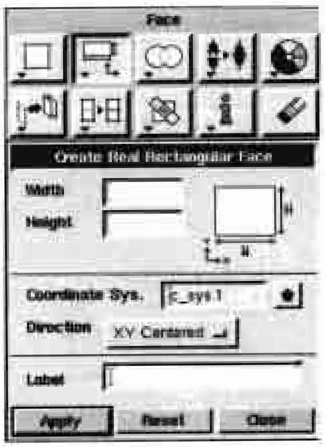


图 2-7 矩形面域的绘制对话框

（5）右击按钮，弹出如图 2-8 所示的下拉列表。

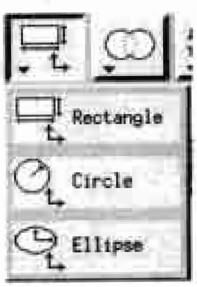


图 2-8 直接生成面域的下拉列表

（6）选择第二个选项，弹出如图 2-9 所示的 Create Real Circular Face 面板。

（7）在 Radius 文本输入框中输入小圆的半径“0.0635”（GAMBIT 默认的绘制长度单位为 m），保持 Plane 选中为 XY（即将面绘制在 *XOY* 平面上，原点为圆心），单击 Apply 按钮，生成如图 2-10 所示的圆面。

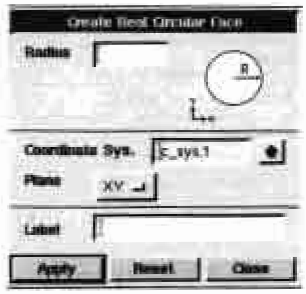


图 2-9 圆生成（Create Real Circular Face）面板

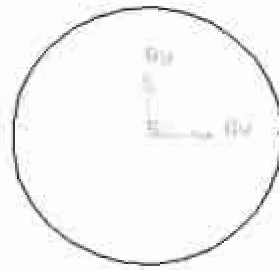


图 2-10 生成的小圆圆面

（8）按照同样的方法，在 Radius 文本输入框中输入大圆的半径“0.1555”，单击 Apply 按钮，此时视图窗口如图 2-11 所示。

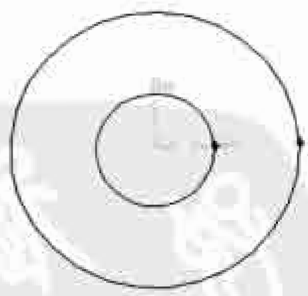


图 2-11 生成两个圆的圆面

（9）单击 Face 面板第二排第一个按钮，弹出如图 2-12 所示的移动/复制（Move/Copy Faces）面板。

（10）单击 Move/Copy Faces 面板中 Faces 黄色高亮输入框，按 Shift+鼠标左键选中小圆面，保持 Move 单选按钮被选中（即进行移动操作），Operation 选择 Translate（即表示以坐标轴方向移动），在 Global 栏中的 X 文本输入框中输入“0.01”，单击 Apply 按钮，如图 2-13 所示。此时视图窗口即呈现出

偏心的两个圆面，如图 2-14 所示。

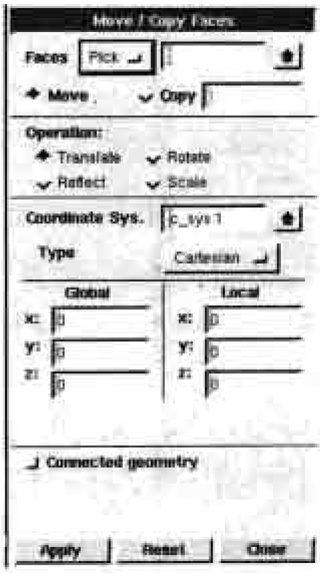


图 2-12　Move/Copy Faces 面板

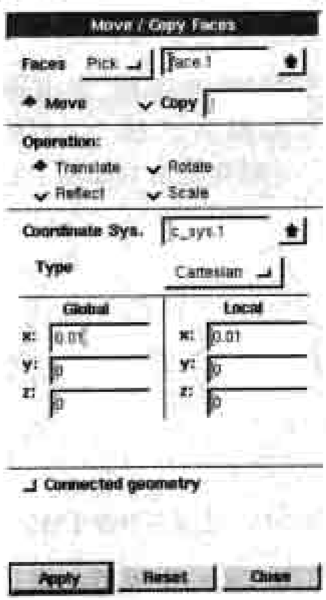


图 2-13　移动小圆面操作

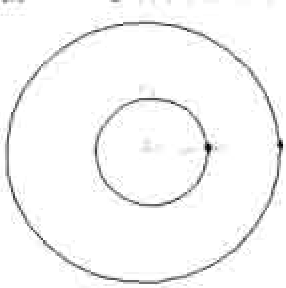


图 2-14　偏心的两个圆面

（11）单击 Face 面板第一排第三个按钮，弹出默认的如图 2-15 所示的布尔并（Unite Faces）面板。

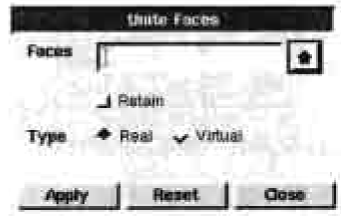


图 2-15　Unite Faces 面板

（12）右击按钮，弹出如图 2-16 所示的下拉列表，选择布尔减选项。

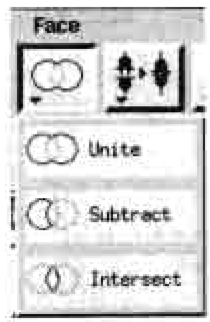


图 2-16　布尔操作下拉列表

（13）在弹出的布尔减（Subtract Real Faces）面板中设置 Face 为大圆面，Faces 为小圆面，如图 2-17 所示，单击 Apply 按钮。

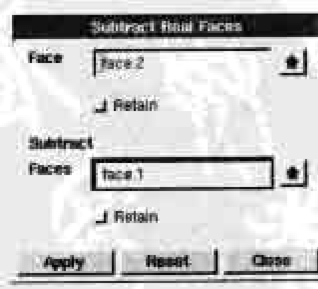


图 2-17　设置布尔减操作

（14）此时，视图窗口中并未看到有变化，可以单击控制面板下方的视图控制面板，选择最下面一排的第三个按钮，如图 2-18 所示，则发现视图窗口呈现出渲染的面域，如图 2-19 所示，这正是所要的偏心圆环的计算区域。

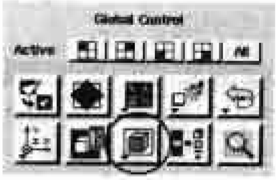


图 2-18　视图控制面板



图 2-19　偏心圆环计算区域

（15）至此，已经完成了几何模型的建立，下面开始进行网格划分。为了能够划分为结构网格，需要添设径向辅助线。单击 Edge 面板中第一排第一个按钮，弹出如图 2-20 所示的绘制线段（Create Straight Edge）面板。在 Vertices 黄色高亮输入框中选中大小圆 *X* 轴上的径向点，选中 Type 右侧的 Virtual 单选按钮（表示生成的线段类型为虚线——辅助线），单击 Apply 按钮，将这两点连接成线，如图 2-21 所示。

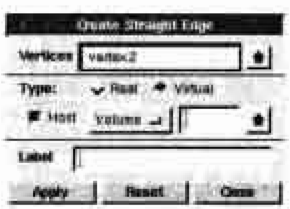


图 2-20　Create Straight Edge 面板

（16）单击操作面板中的按钮，进行网格划分。此时展开 Mesh 操作面板，如图 2-22 所示，单击“线网格划分”按钮，继续展开其下一级操作面板——网格划分操作面板。单击线网格划分操作面板中第一行第一个按钮，弹出如图 2-23 所示的 Mesh Edges 面板，在 Edges 黄色高亮输入框中选中径向辅助线 v_edge.4，选择 Spacing 右侧的 Interval count 选项（表示按段数划分），并在左侧的文本输入框中输入“8”（即将径向辅助线划分为 8 段），保持其余默认设置，单击 Apply 按钮。此时，可以看到视图窗口中径向辅助线已经被分割成 8 段，如图 2-24 所示。

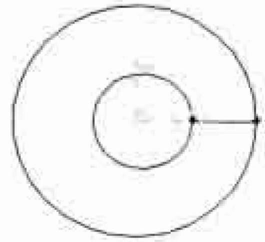


图 2-21　径向辅助线

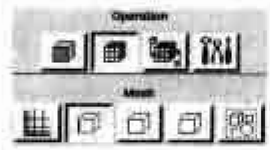


图 2-22　Mesh 操作面板

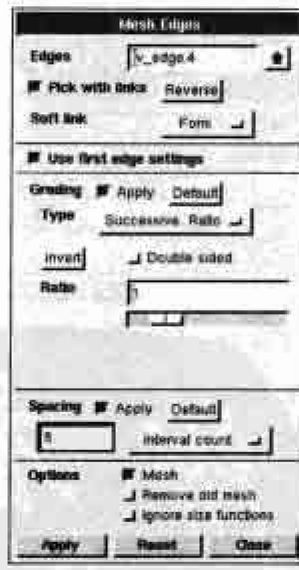


图 2-23　Mesh Edges 面板

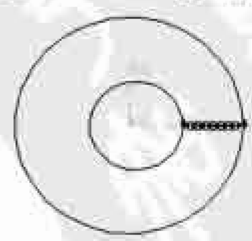


图 2-24　径向辅助线网格

（17）按照同样的方法，将大小圆均分割成 50 段，在 Edges 黄色高亮输入框中选中

两个圆环线段，选择 Interval count 选项并在左侧文本输入框中输入“50”，生成如图 2-25 所示的线网格。

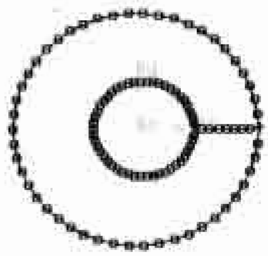


图 2-25　圆环的线网格

（18）将计算区域用径向辅助线分割，单击 Face 操作面板中第二排第二个按钮，弹出如图 2-26 所示的面分割（Split Face）面板。

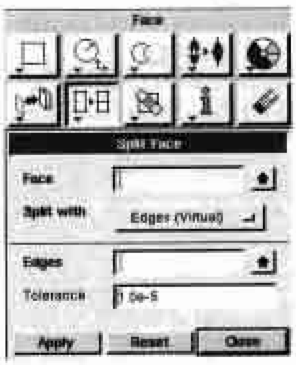


图 2-26　Split Face 面板

（19）在 Split Face 面板的 Face 黄色高亮输入框中选中计算区域，设置 Split with 为 Edges(Virtual)（即用虚线来分割面），然后在 Edges 黄色高亮输入框中选中径向辅助线，单击 Apply 按钮，即完成了分割操作。

（20）单击 Mesh 操作面板的第一行第一个按钮，弹出如图 2-27 所示的面网格生成（Mesh Faces）面板。选中计算区域面，保持对话框中所有的默认设置，单击 Apply 按钮，得到本例的计算网格，如图 2-28 所示。

（21）最后还需要进行边界类型的定义，单击操作面板中的第三个按钮，展开 Zones 操作面板，如图 2-29 所示。其中有两个按钮，分别对应了边界类型定义和介质类型定义。由于本例只涉及一个计算区域，不需要进行介质类型的定义。

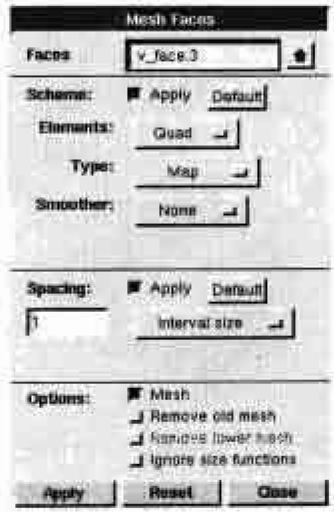


图 2-27　Mesh Faces 面板

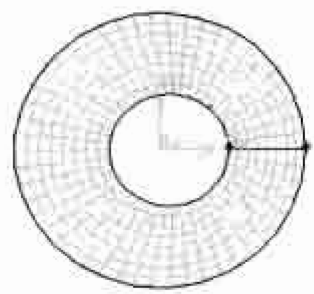


图 2-28　计算网格

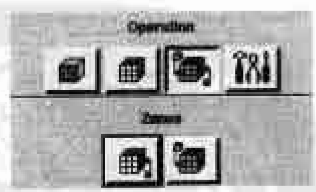


图 2-29　Zones 操作面板

（22）单击“边界类型定义”按钮，弹出如图 2-30 所示的边界类型定义（Specify Boundary Types）面板，在 Name 文本输入框中输入要定义边界的名称，如“neibi”（内壁——小圆壁面），选择其 Type 为 WALL（壁面边界类型），选择 Edges 为小圆环对应的线段（edge.3），单击 Apply 按钮。同样将大圆环边界类型也定义为 WALL，名称为 waibi。

（23）模型、网格、边界类型定义都完成之后，需要将网格文件输出。选择 File→

Export→Mesh 命令，如图 2-31 所示，弹出如图 2-32 所示的网格输出（Export Mesh File）对话框。保持 File Name 为 2-1.msh（后缀名.msh 表示为网格文件），选中 Export 2-D(X-Y) Mesh 复选框，意味着输出的网格文件是一个二维的网格。最后单击 Accept 按钮，直到 Transcript 列表框最后一行出现“Mesh was successfully written to 2-1.msh.”语句，如图 2-33 所示，表示网格文件输出成功。

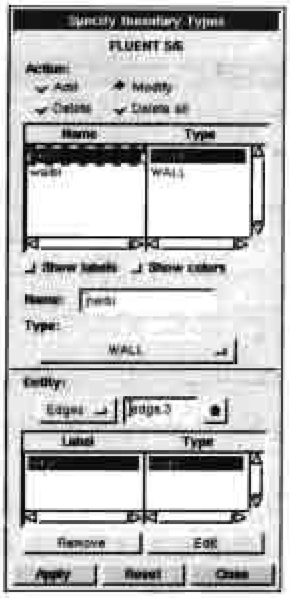


图 2-30 Specify Boundary Types 面板

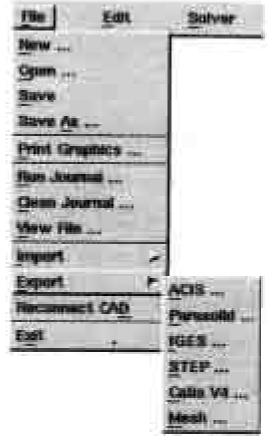


图 2-31 选择菜单命令



图 2-32 Export Mesh File 对话框

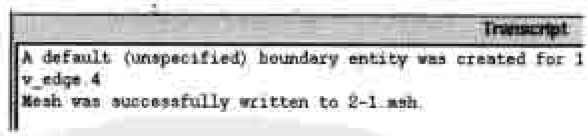


图 2-33 网格输出成功提示

（24）最后选择 File→Exit 命令，安全退出 GAMBIT。

2.2 GAMBIT 几何建模

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch2\2-2.avi 文件。

GAMBIT 本身具有较强的几何建模功能，完全可以实现常见问题的模型建立，若问题相对复杂而 GAMBIT 无法实现时，还可以借助其他 CAD/CAE 软件进行建模，建立好的模型可导入 GAMBIT 进行后续的网格划分。

几何模型的建立通常遵循点→线→面→体的顺序，也可直接生成面和体。打开 GAMBIT 软件，单击操作面板上的按钮，即可弹出如图 2-34 所示的几何建模（Geometry）面板，通过该面板中的操作按钮可完成 GAMBIT 的建模任务。

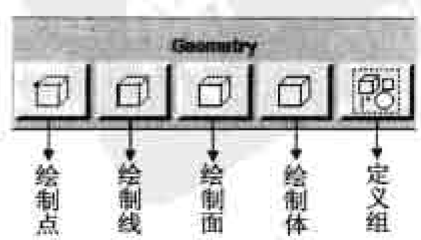


图 2-34 几何建模工具面板

2.2.1 点

单击几何建模面板上的第一个按钮，弹出如图 2-35 所示的 Vertex 面板，用户可在 Create Real Vertex 面板的 Global 栏中的 X、Y、Z 文本输入框中输入点的三维坐标，单击 Apply 按钮后即可在视图窗口中生成相应的点。有些特殊模型还可以通过改变坐标生成的方式实现，单击 Type 右侧的按钮，在弹出的下拉列表中显示了坐标生成的类型，有 Cartesian（笛卡儿坐标）、Cylindrical（柱坐标）和 Spherical（球坐标）3 种，如图 2-36 所示。

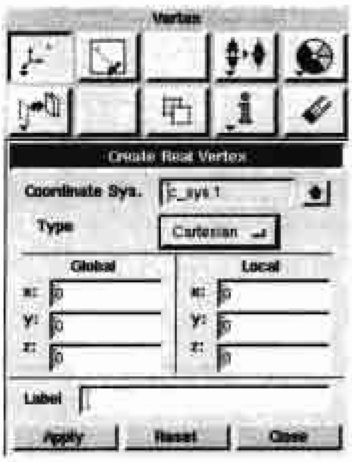


图 2-35　Vertex 面板

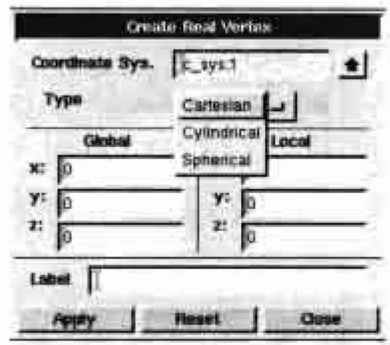


图 2-36　点坐标绘制时的方式

提示： 某些简单的问题可以跳过点绘制这一步，直接生成面或体模型。而当研究的问题相对复杂时，最好的办法是遵循点→线→面→体的顺序，读者可先计算出全部点的坐标，然后依次在 Create Real Vertex 面板中输入点坐标生成所有的点。

点绘制方式共有 7 种，通过右击按钮，可查看其列表，如图 2-37 所示，从上至下依次为根据坐标生成点、在线上生成点、在面上生成点、在体上生成点、由交点生成点、由质心生成点和投影生成点，用户可根据实际需要选择相应的点绘制方式。

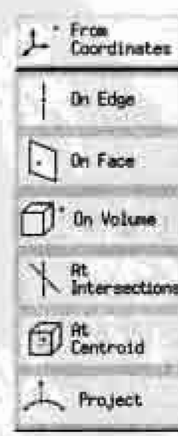


图 2-37　几何建模工具面板

在 Vertex 面板中还有几个常用的命令，如 Move/Copy 命令、色彩定义命令和删除命令等，下面分别对这 3 个命令进行介绍。

- 单击 Vertex 面板第二行第一个按钮，将弹出如图 2-38 所示的 Move/Copy Vertices 面板，在 Vertices 黄色高亮输入框中可以选取需要移动或复制的点，Operation 栏中提供了移动/复制操作的方式，有平移（Translate）、旋转（Rotate）、映射（Reflect）和尺寸缩放（Scale）等。
  - 最常用的点移动/复制操作为平移（Translate）和旋转（Rotate）两种，平移相对简单，只需要在 Move/Copy Vertices 面板的 Global 栏中的 X、Y、Z 文本输入框中输入 3 个方向平移的距离即可，若在某一方向没有移动，可保持其默认值为 0。

❖ 旋转操作时的面板显示如图 2-39 所示，需要用户在 Angle 文本输入框中输入需要旋转的角度，GAMBIT 默认逆时针方向为正值，顺时针方向为负值。除了定义旋转角度外，还需要定义旋转轴。单击 Define 按钮，弹出如图 2-40 所示的旋转轴定义（Vector Definition）面板，面板中部为旋转轴定义的类型，单击可弹出下拉列表，有以笛卡儿坐标轴为旋转轴、以某一条边为旋转轴、以两个绘制好的点间连线为旋转轴和以两个待定义的坐标点间连线为旋转轴 4 种方式。旋转轴定义好后，单击 Apply 按钮关闭 Vector Definition 面板，回到 Move/Copy Vertices 面板后，单击 Apply 按钮即可实现旋转操作。

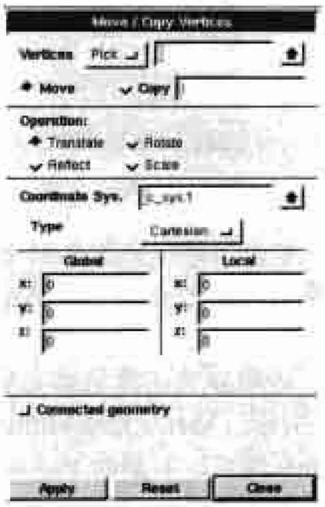


图 2-38　Move/Copy Vertices 面板平移操作时的显示

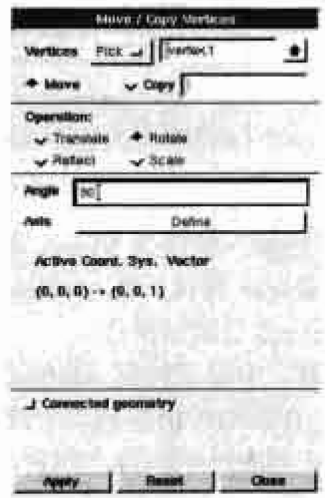


图 2-39　Move/Copy Vertices 面板旋转操作时的显示

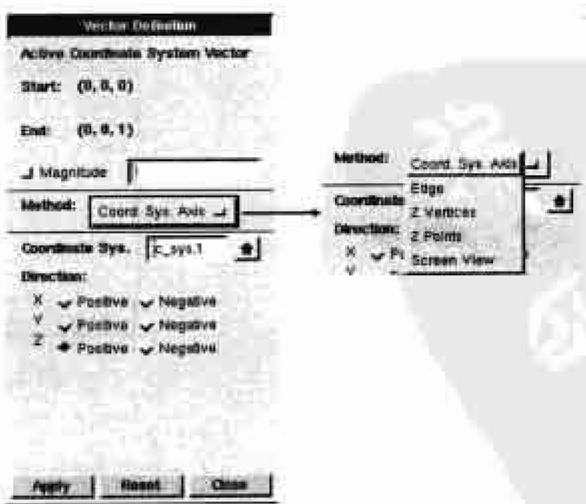


图 2-40　Vector Definition 面板

◆ "色彩定义"按钮为 Vertex 面板第一行第五个按钮，单击可弹出 Modify Vertex Color 面板，如图 2-41 所示。在 Vertices 黄色高亮输入框中可选择需要进行色彩调整的点，Color 栏中为配色方案，由于点只存在于几何模型（线、面、体还存在网格），所以 Color 栏中仅有 Geometry 的配色方案。在 GAMBIT 默认的黑底视窗中点的颜色默认为

白色，可以点击当前颜色，弹出 Set Color 面板，如图 2-42 所示。其中呈现了多种可供选择的色彩，且色彩中部注明了其名称。选中色彩后，单击 Apply 按钮，退出 Set Color 面板，回到 Modify Vertex Color 面板中单击 Apply 按钮，即可完成色彩的重新定义。



图 2-41　Modify Vertex Color 面板

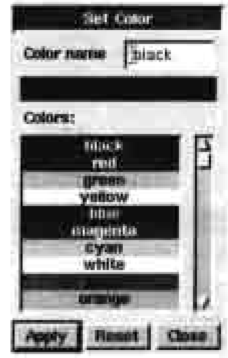


图 2-42　配色方案

◆ “删除”按钮为 Vertex 面板第二行第五个按钮，单击可弹出如图 2-43 所示的 Delete Vertices 面板，在 Vertices 黄色高亮输入框中选择需要删除的点后单击 Apply 按钮，即可完成点删除操作。

GAMBIT 中除了使用 Shift+左键单击可以选中对象外，还可以单击黄色高亮输入框右侧的向上箭头，在弹出的清单列表中选择待选对象，如图 2-44 所示。Vertex List(Multiple)面板左侧的 Available 列表框中为待选列表，显示了当前视图窗口中所有的点，右侧的 Picked 列表框中为已选列表，显示了已经被选择了的点。两边列表的移动可通过中间的 4 个箭头完成，上面的两个箭头表示选择点的一次转移，而下方两个箭头则表示全部转移。



图 2-43　Delete Vertices 面板

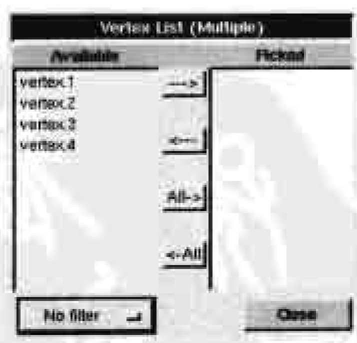


图 2-44　点列表

2.2.2　线

单击几何建模面板的第二个按钮，弹出如图 2-45 所示的 Edge 面板，用户可以在 Create Straight Edge 面板的 Vertices 黄色高亮输入框中选取需要连接成直线的两点，单击 Apply 按钮就会在选择的两点间建立一条直线。

除直线外，GAMBIT 还可以实现其他多种形式线段的绘制。用户可右击按钮，在弹出的如图 2-46 所示的线生成方式列表中进行选择，从上至下依次为直线、圆弧、圆、椭圆、倒角、

二次曲线、样条曲线、点横扫成线和点旋转成线等。



图 2-45　Create Straight Edge 面板



图 2-46　线生成方式列表

与点不同，线的色彩定义命令多了网格色彩方案的设置，如图 2-47 所示。Color 栏中有两个选项 Geometry 和 Mesh，分别对应线段的几何模型和网格。

Edge 面板与 Vertex 面板不同的是多了“分离”按钮，单击该按钮将弹出如图 2-48 所示的线分段（Split Edge）面板。可在 Edge 黄色高亮输入框中选择要分割的线段，以已有点、坐标点或线段进行分割。Point 为坐标点，当选择它时需要用户输入用于切割的点坐标；Vertex 为已有点，选择它时需要用户选择视图窗口中已经存在的点；Edge 为已有线段，用户可选择与被切割线段相交的另外一条线段将其分割。



图 2-47　线的色彩定义

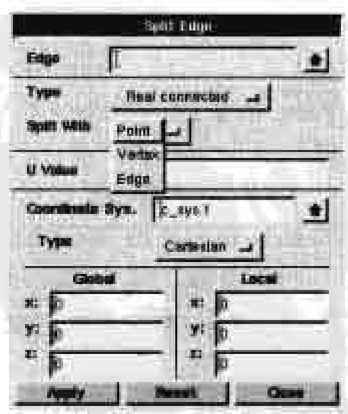


图 2-48　Split Edge 面板

2.2.3　面

单击几何建模面板的第三个按钮，可弹出 Face 面板，如图 2-49 所示，利用它可以进行面的绘制。单击 Face 面板中的第一个按钮将弹出由线围成面（Create Face from Wireframe）面

板，只需在 Create Face from Wireframe 面板中 Edges 黄色高亮输入框中选取要围成面的线段，单击 Apply 按钮即可。

右击按钮同样会弹出其他绘制面的方式列表，如图 2-50 所示，除线框围成面外，还有三点生成平行四边形面、三点生成圆面、三点生成椭圆面、多点生成多边形面、线扫掠成面和线旋转成面等。

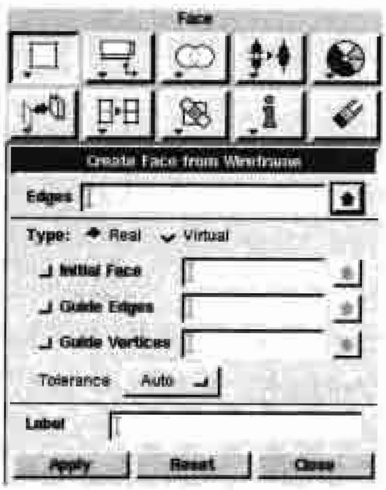


图 2-49　Face 面板

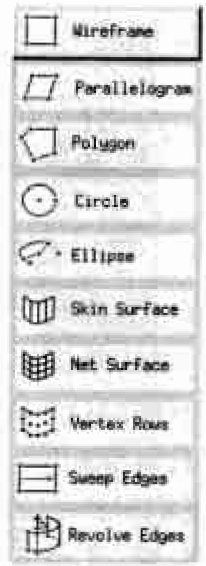


图 2-50　面生成方式列表

提示： 由线框生成面方法中所选取的线段必须是封闭的。可根据给定路径，也可根据轮廓曲线生成扫掠面。

除点→线→面由点→面的生成方法外，还可以直接绘制面，单击 Face 面板第一排第二个按钮，即可弹出矩形绘制（Create Real Rectangular Face）面板，如图 2-51 所示。在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width（宽）、Height（高）文本输入框中输入相应数值，即可生成矩形，并默认以原点为中心建立在 *XOY* 平面上。通过单击 Direction 右侧的 XY Centered 按钮可以改变中心点及生成平面的位置。

右击按钮，弹出如图 2-52 所示的面样式列表，用户可利用其直接生成圆或椭圆。对于简单规则的平面，GAMBIT 提供的此项功能比由点开始绘制方便得多，大大节约了建模的时间。

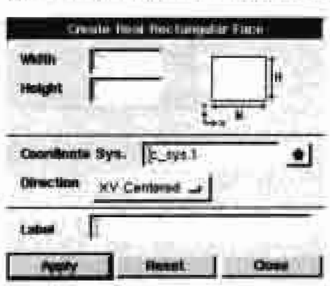


图 2-51　Create Real Rectangular Face 面板

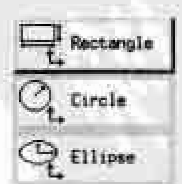


图 2-52　面样式列表

Face 面板也多了“切割”按钮，单击该按钮将弹出如图 2-53 所示的 Split Face 面板，可

以通过实面、虚面、虚线、虚点及指定位置进行面分割。

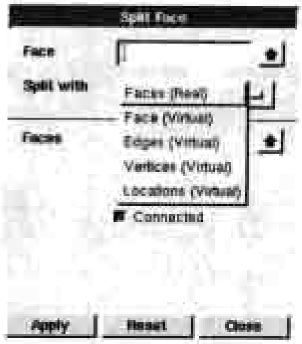


图 2-53　Split Face 面板

2.2.4　体

几何建模面板的第四个按钮为“体绘制”按钮，单击会弹出 Volume 面板，如图 2-54 所示。单击面板中的第一个按钮，将弹出由面围绕成体（Stitch Faces）面板，用户只需在 Stitch Faces 面板中的黄色高亮输入框内选取要围绕成体的所有的面，单击 Apply 按钮即可。

与线、面一样，除上面的方法之外，GAMBIT 还提供了扫掠成体、旋转成体和在现有拓扑结构上生成体 3 种方法，右击按钮即可弹出隐藏这 3 种方法的体生成方式列表，如图 2-55 所示。

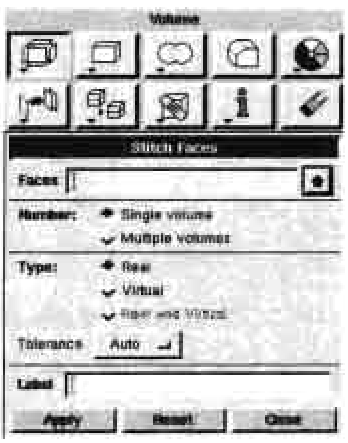


图 2-54　Volume 面板



图 2-55　体生成方式列表

同样，几何体也可以直接被绘制，单击 Volume 面板第一行第二个按钮，弹出六面体生成（Create Real Brick）面板，如图 2-56 所示。在 Create Real Brick 面板中的 Width(X)、Depth(Y)、Height(Z)文本输入框中输入宽、长、高即可生成对应的六面体，默认生成方法仍然是以原点为中心的。其他直接生成几何体的方式为右击按钮并在弹出的实体样式列表中选择，如图 2-57 所示，从上至下依次为圆柱体、棱柱体、棱锥体、台体、球体和圆环体等。

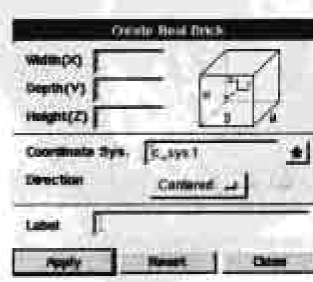


图 2-56　Create Real Brick 面板

提示：GAMBIT 提供的三维建模功能相对较弱，借助视图、布尔运算可以生成相对规则的几何体，但对于复杂的三维几何模型，则需要利用 CAD/CAE 等其他建模辅助工具。

单击 Volume 面板中的“切割”按钮，弹出如图 2-58 所示的 Split Volume 面板，在其中可以通过实体、实面、虚面和指定位置进行体分割。



图 2-57　实体样式列表

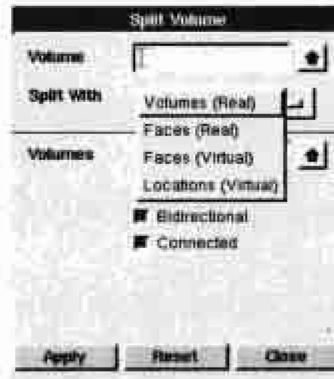


图 2-58　Split Volume 面板

2.2.5　其他辅助操作

除上述点、线、面、体的建模操作外，还有一些常用或共有的命令，如图 2-59 所示。在面和体的建立过程中，布尔运算经常被用到，主要为取并集、交集和一个面或体减去另一个面或体 3 种方式。而对于重合的点、线、面，常需将其合并，以方便边界类型的定义。若不需要时，还可将已合并的点、线、面解除合并连接状态。与点的色彩和删除命令一样，线、面、体均有色彩调整和删除按钮，操作方式与点一致，这里不再详述。如果需要了解当前视图窗口中几何模型的信息，可以单击按钮，在文本窗口中查看对应信息。



图 2-59　其他常用建模操作按钮说明

2.3　GAMBIT 网格划分

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch2\2-3.avi 文件。

单击操作面板中的第二个按钮，可以弹出网格划分（Mesh）面板，如图 2-60 所示。

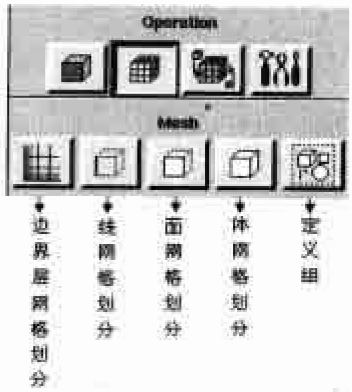


图 2-60　Mesh 面板

2.3.1　边界层

对于粘度影响很大和精度要求较高的流体流动，由于近壁面粘性效应明显及流场参数变化梯度较大，需要用户进行边界层网格的划分。由于一般 CAE 前处理软件是根据结构强度分析的需要而设计的，通常不考虑边界层，因此难以满足 CFD 计算的精度要求，而 GAMBIT 很好地满足了这一特殊需要。单击按钮，弹出如图 2-61 所示的边界层划分（Create Boundary Layer）面板，需要在 First row（第一个网格点距边界的距离）、Growth factor（网格的比例因子）、Rows（边界层网格点数）及 Depth（边界层厚度）4 组参数中任意输入 3 组，Transition pattern 选项则提供了 4 种不同的边界层划分形式（1:1、4:2、3:1 和 5:1）。

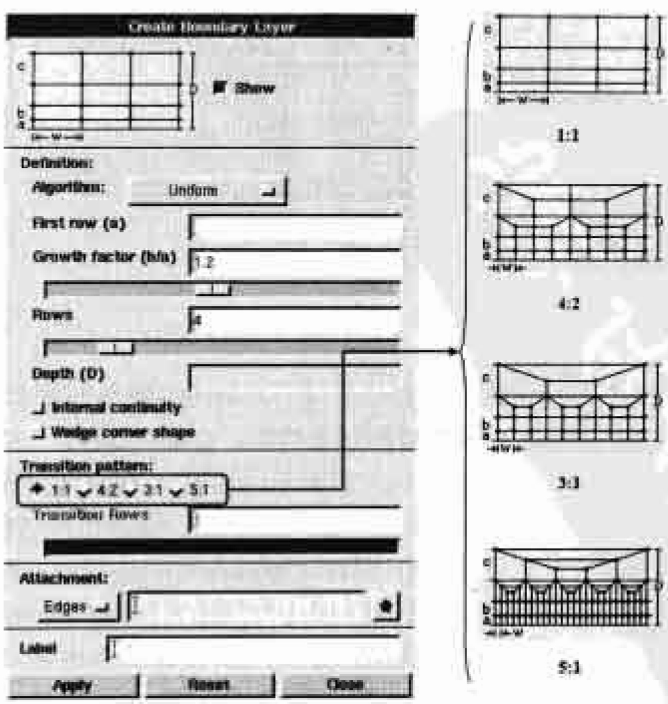


图 2-61　Create Boundary Layer 面板及边界层类型

2.3.2 线

单击按钮，弹出如图 2-62 所示的线网格划分（Mesh Edges）面板。可在黄色高亮输入框中选取一根或多根待划分的线段，然后在 Ratio 文本输入框中输入比例因子，可以单调递增或单调递减，默认值为 1，即均匀分布。若同时选中 Double sided 复选框，则需要输入两个比例因子，使得划分出来的网格呈现中间密两端疏或中间疏两端密的形式。划分时，可基于网格尺寸（Interval size）或总段数（Interval count）将线段分段。若需要在已划好的线段上重新划分网格，还需要选中 Remove old mesh 复选框，以删除先前的网格。

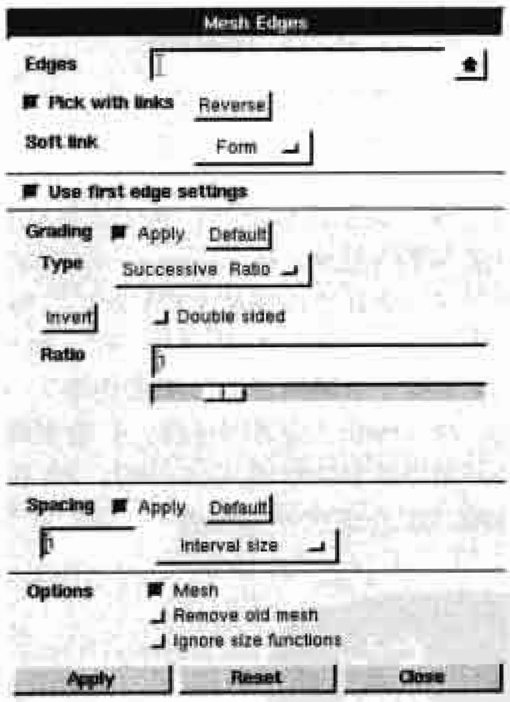


图 2-62　Mesh Edges 面板

2.3.3 面

Mesh 面板中第三个按钮为“面网格划分”按钮，单击会弹出 Mesh Faces 面板，如图 2-63 所示。其中的 Elements 栏中提供了 3 种面网格划分类型：Quad 为四边形网格形式；Tri 为三角形网格形式；Quad/Tri 为四边形网格和三角形网格混合的形式。Type 栏中提供了 5 种网格划分的方法：Map 为将区域划分为四边形的结构性网格；Submap 可将一个不规则的区域划分为几个规则的区域，并同时划分为结构性网格；Pave 则将区域划分为非结构性网格；Tri Primitive 为将一个三角形区域划分为 3 个四边形区域，并同时划分为四边形网格；Wedge Primitive 则是在一个楔形的尖端划分为三角形网格，沿着楔形向外辐射，划分为四边形网格。

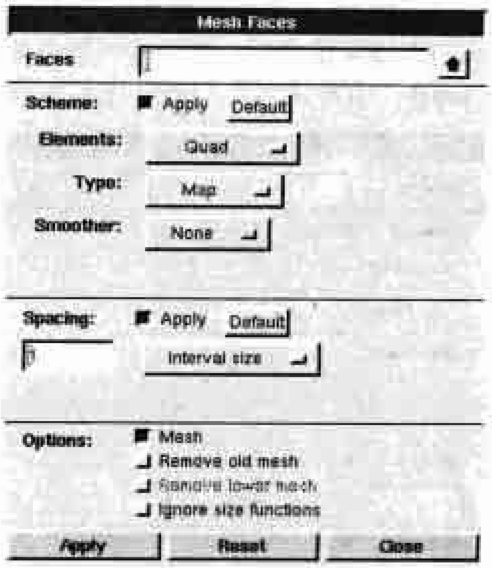


图 2-63　Mesh Faces 面板

虽然有这么多的网格划分方法，但并不适用于所有的网格类型，具体的适用类型如表 2-1 所示。

提示：读者在进行面网格划分时，一定要依据各划分方法选择适用的类型，否则将提示网格划分失败。

表 2-1　面网格划分方法适用的网格类型

划分方法	适用类型		
	Quad	Tri	Quad/Tri
Map	√		√
Submap	√		
Pave	√	√	√
Tri Primitive	√		
Wedge Primitive			√

2.3.4　体

单击 Mesh 面板中的第四个按钮，将弹出体网格划分（Mesh Volumes）面板，如图 2-64 所示。

与面网格划分面板类似，Mesh Volumes 面板中的 Elements 栏中提供了 3 种体网格划分类型：Hex 为六面体网格形式；Hex/Wedge 主要为六面体网格形式，在适当位置包含楔形网格；Tet/Hybrid 主要是四面体网格形式，在适当位置包含六面体、锥形和楔形网格。Type 栏中提供了 6 种方法：Map 是将体划分为六面体结构化网格；Submap 则将一个不可图示化的体分割成可图示化区域，并将每个区域划分为六面体结构化网格；Tet Primitive 是将一个含 4 个侧面的体分

割成 4 个六面体区域，并将每个区域划分为可图示化网格；Cooper 是将体按照指定的源面进行划分；TGrid 是将体主要划分为四面体网格单元，但在适当的位置可以包含六面体、锥体和楔形单元；Stairstep 可划分为六面体网格，并生成一个与原始体积形状近似的平滑的体。

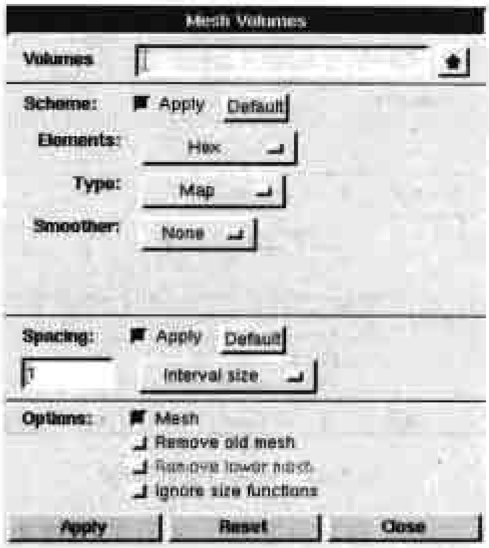


图 2-64　Mesh Volumes 面板

与面网格一样，并不是所有的划分方式都适合不同的几何体，体网格划分方法具体的适用类型如表 2-2 所示。

表 2-2　体网格划分方法适用的网格类型

划 分 方 法	适 用 类 型		
	Hex	Hex/Wedge	Tet/Hybrid
Map	√		
Submap	√		
Tet Primitive	√		
Cooper	√	√	
TGrid			√
Stairstep	√		

2.4　GAMBIT 边界与介质类型定义

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch2\2-4.avi 文件。

在完成了几何建模与网格划分之后，用户还需要定义问题的边界和介质类型。单击按钮，弹出如图 2-65 所示的边界定义面板，其中共有两个命令按钮，对应了边界和介质类型的定义。

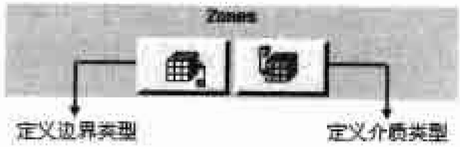


图 2-65　边界定义面板

2.4.1　边界定义

单击按钮，弹出如图 2-66 所示的 Specify Boundary Types 面板。读者可以在该面板中完成添加、删除或修改边界类型的定义，并可在 Name 文本输入框中输入区别性较好且便于记忆的名字，这里的 Type 提供了 22 种流动进、出口边界类型，如图 2-67 所示，被定义边界类型的对象通常为线、面或组，下面介绍常用的 13 种边界类型。

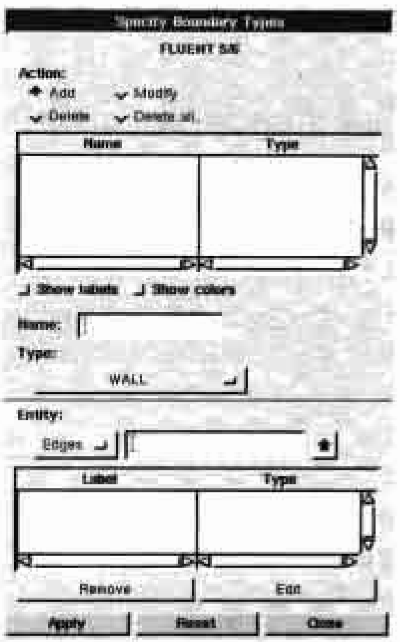


图 2-66　Specify Boundary Types 面板

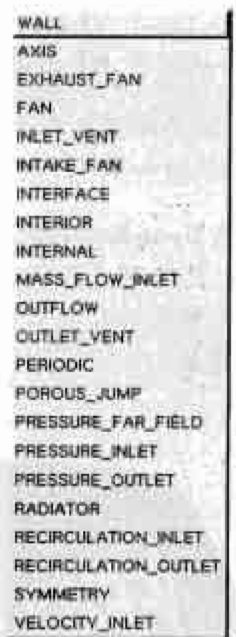


图 2-67　边界类型列表

- WALL：壁面边界，或称为固体壁面，通常用于限制流体和固体区域，该类型定义后可在 FLUENT 中具体定义其为静止、运动、滑移或热边界。
- VELOCITY_INLET：速度入口边界，该类型定义后可在 FLUENT 中输入具体的流动入口速度和标量。
- MASS_FLOW_INLET：质量流动入口边界，定义后可在 FLUENT 中输入具体的质量流速，该类型适用于可压缩流体，对于不可压缩流体可不必定义此种类型。
- PRESSURE_INLET：压力入口边界，该类型定义后可在 FLUENT 中具体输入入口边界的总压、静压等标量。
- OUTFLOW：出口流动边界，该边界用于模拟未知出口速度或压力的情况，假定了除压力之外的所有流动变量正法向的梯度为 0，不能用于定义可压缩流动的边界。

- PRESSURE_OUTLET：压力出口边界，FLUENT 中可输入具体的出口静压值，当有回流时，使用压力出口边界代替 OUTFLOW 边界往往更容易收敛。
- PRESSURE_FAR_FIELD：压力远场边界，用于模拟无穷远处的自由可压流动，只适用于可压缩流动。
- SYMMETRY：对称边界，用于研究对象具有镜像特征的情况。
- AXIS：轴边界，必须使用在几何外形的中线处。
- INTAKE_FAN：进气扇边界，用于模拟外部进气扇，FLUENT 中需要给定压降、流动方向、周围环境的总压及总温。
- EXHAUST_FAN：排气扇边界，用于模拟外部排气扇，FLUENT 中需给定压力跳跃及周围环境的静压。
- INLET_VENT：进风口边界，用于模拟进风口，FLUENT 中需给定损失系数、流动方向、周围环境的总压及总温。
- OUTLET_VENT：通风口边界，用于模拟通风口，FLUENT 中需给定损失系数、周围环境的静压和静温。

提示：边界类型定义时应根据实际的流体流动性质选择合适的边界类型，尤其是区别可压缩流动和不可压缩流动。

Specify Boundary Types 面板中的 Show labels 和 Show colors 复选框可方便读者查看已定义好的边界，选中时呈红色显示，可以看到视图窗口中出现已定义边界的颜色和标记，如图 2-68 所示。对于复杂的几何模型，打开标签或颜色可以大大提高边界定义的效率，并可避免错误定义或重复定义。

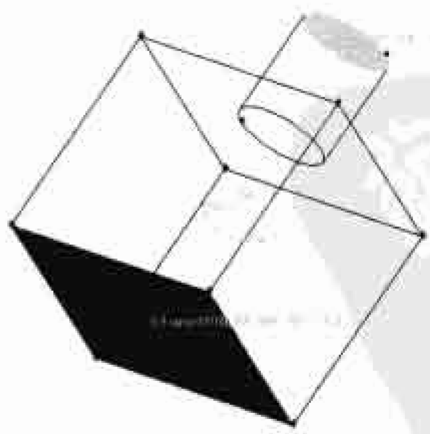


图 2-68 打开 Show labels 和 Show colors 时的模型视图

2.4.2 介质定义

单击按钮弹出介质类型定义（Specify Continuum Types）面板，如图 2-69 所示。对于固体与流体共存的计算模型，如流体与固体之间的传热问题，需要定义不同区域的介质类型。其中的 Type 栏中提供了固体和流体两种类型，被定义介质类型的对象通常为面、体或组等区域。

其余填加、删除、修改、命名及标签、色彩显示功能等与边界类型定义相同，在此不再详述。

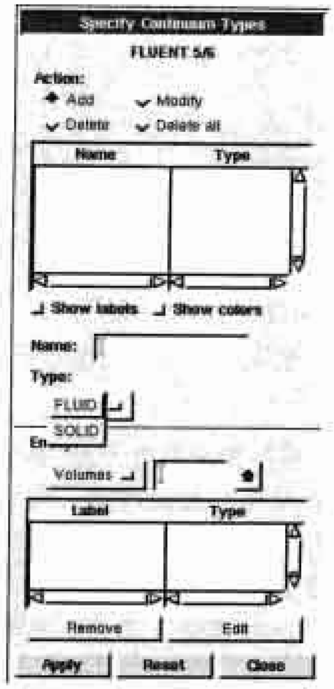


图 2-69 Specify Continuum Types 面板

2.5 实例・操作——三维圆柱体

管流是最常见的流体流动，如图 2-70 所示。流体在自来水管、污水管、工业管道内的流动参数是设计与运行管理管道的关键参数，尤其是速度、压强、温度的分布情况。根据流体运动分析，可以指导管径的选择、管网的布置和泵站的间距等。

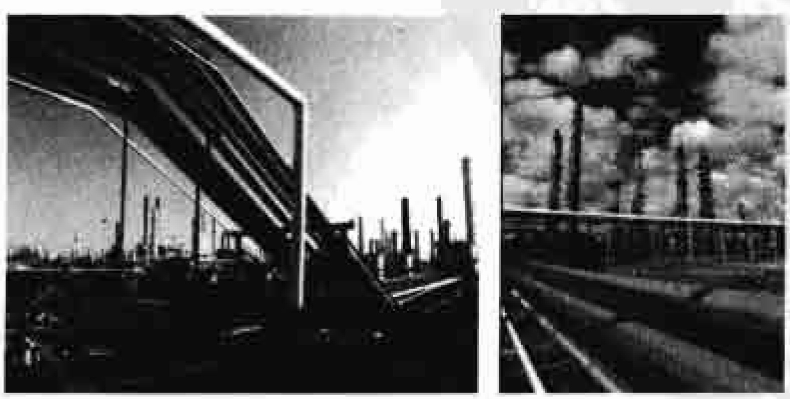


图 2-70 工业管道

管内流体的流动区域为三维圆柱体，下面对其进行模型的建立与网格的划分，尺寸如图 2-71 所示。

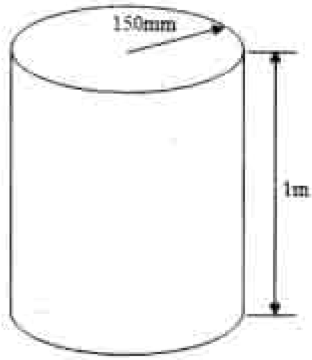


图 2-71　三维圆柱体尺寸

【思路分析】

三维圆柱体模型建立相对简单，可以直接采用 GAMBIT 的 Create Real Cylinder 命令，但圆柱体的网格划分相对复杂，若想得到较高质量的网格，则需要将圆柱体进行分块，然后分别划分。本例先画一个圆面，且将圆面 4 等分，即每一等分为 1/4 的圆，然后将每个 1/4 圆进行网格划分，完成后采用拉伸命令，将面横扫生成体，并选中间网格一起横扫，这样就可以避免分割体的麻烦。最后，定义圆柱体的上下面为进出口边界，侧壁面为壁面边界。模型建立及网格划分流程如图 2-72 所示。

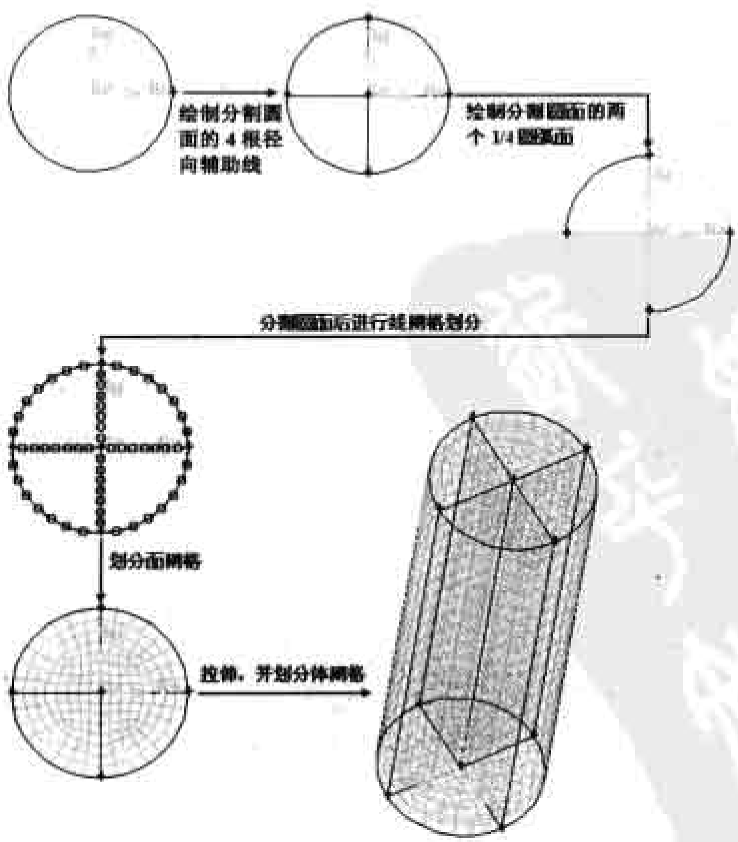


图 2-72　三维圆柱体建模及网格划分流程图

【光盘文件】

结果文件 ——参见附带光盘中的 END\Ch2\2-5.msh 文件。

动画演示 ——参见附带光盘中的 AVI\Ch2\2-5.avi 文件。

【操作步骤】

（1）选择菜单栏中的 File→New 命令，弹出 Create New Session 对话框，如图 2-73 所示。在 ID 和 Title 文本输入框中输入“2-5”，取消选中 Save current session 复选框（若选中，其左侧按钮将显示为红色），单击 Accept 按钮。



图 2-73　Create New Session 对话框

（2）单击“面绘制”按钮，在弹出的面操作面板中单击按钮，弹出如图 2-74 所示的 Create Real Circular Face 面板，在 Radius 数据输入框中输入半径“0.15”，保持 Plane 为 XY，单击 Apply 按钮。此时，视图窗口中已出现了一个圆面，如图 2-75 所示。

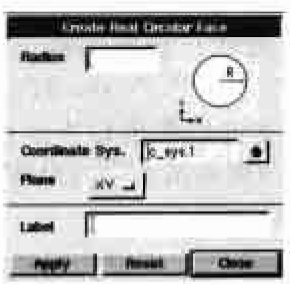


图 2-74　Create Real Circular Face 面板



图 2-75　当前视图窗口中的圆面

（3）图 2-75 中的圆面上有一个点，利用该点，在圆环上复制出将圆面 4 等分的其余 3 点。单击“点绘制”按钮，在 Vertex 面板中单击按钮，弹出图 2-76 所示的点移动/复制（Move/Copy Vertices）面板。

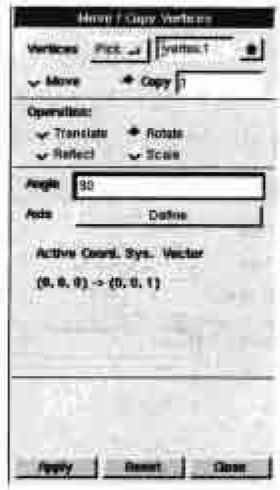


图 2-76　Move/Copy Vertices 面板

（4）在 Move/Copy Vertices 面板的 Vertices 栏中选中该点，选中 Copy 单选按钮使其红色显示，设置 Operation 为 Rotate，并在 Angle 数据输入框中输入“90”，保持 Axis 默认的 Z 轴为旋转轴，单击 Apply 按钮，则可在圆环上得到以第一个点逆时针旋转 90° 生成的第二个点，如图 2-77 所示。

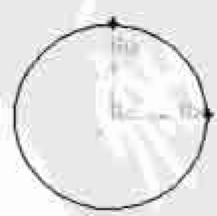


图 2-77　复制生成第二个点

（5）接着重复步骤（4）的操作，以第

二个点逆时针旋转 90° 生成第三个点，以第三个点逆时针旋转 90° 生成第四个点，如图 2-78 所示。



图 2-78　用于将圆环面 4 等分的 4 个点

（6）单击“线绘制”按钮，在 Edge 面板中单击按钮，弹出如图 2-79 所示的 Split Edge 面板。在 Edge 黄色高亮输入框中选择圆环线，并选择 Split With 的方式为 Vertex，接着在 Vertex 黄色高亮输入框中依次选中前面绘制的 3 个点，单击 Apply 按钮。

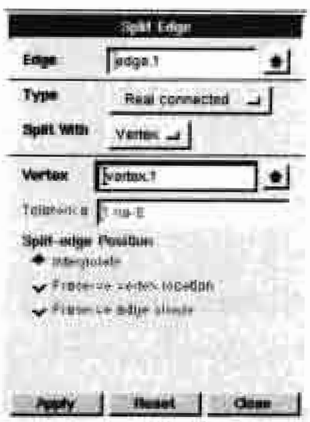


图 2-79　Split Edge 面板

（7）单击“点绘制”按钮，在 Vertex 面板中单击按钮，弹出如图 2-80 所示的 Create Real Vertex 面板，保持默认设置，单击 Apply 按钮，生成原点，也即是圆面的圆心。

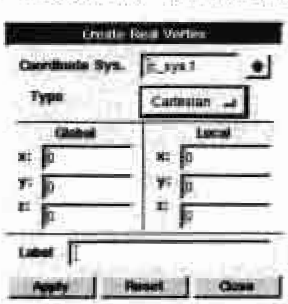


图 2-80　Create Real Vertex 面板

（8）单击按钮，在弹出的 Edge 面板中单击按钮，弹出如图 2-81 所示的 Create Straight Edge 面板。在 Vertices 黄色高亮输入框中选中圆心及圆环上的一点，单击 Apply 按钮，连接生成这两点间的线段。依次按相同方法生成圆环上其余 3 点与圆心间的连线，如图 2-82 所示。

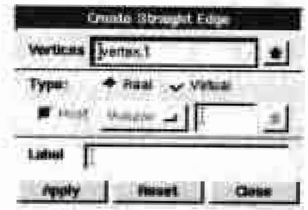


图 2-81　Create Straight Edge 面板



图 2-82　4 根辅助线

（9）单击按钮，弹出 Face 面板，单击按钮，在弹出的 Create Face from Wireframe 面板的 Edges 黄色高亮输入框中选择两根径向线及它们所夹的圆弧，如图 2-83 所示，单击 Apply 按钮，则将这 3 条线围成的 1/4 圆弧生成为一个面域。按照同样的方法，将刚生成的面域径向对称的 1/4 圆也生成一个面域，这样在当前视图窗口中就已存在 3 个面，即一个圆面和两个径向对称的 1/4 圆弧面，如图 2-84 所示。

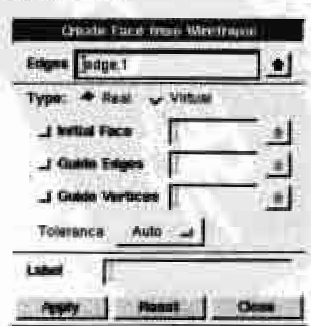


图 2-83　Create Face from Wireframe 面板

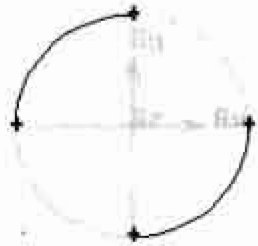


图 2-84　当前视窗中的 3 个面域

（10）单击 Face 面板上的按钮，弹出 Split Face 面板，如图 2-85 所示，在 Face 文本输入框中选中圆面（face.1），选择 Split with 的方式为 Faces(Real)，即以实面切割，在 Faces 黄色高亮输入框中选择两个径向对称的 1/4 圆弧面（face.2 和 face.3），并取消选中下方的 Retain 复选框（即两个 1/4 圆弧面只是辅助面，完成切割命令后将被删除），单击 Apply 按钮。此时即完成了将一个圆面 4 等分的操作。

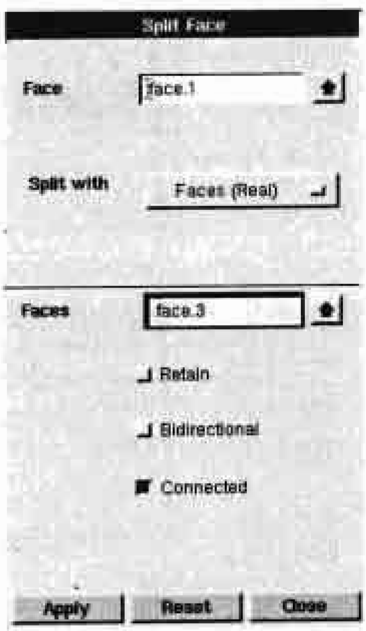


图 2-85　Split Face 面板

（11）首先对这个圆面进行网格划分。依次单击、、按钮，弹出 Mesh Edges 面板，如图 2-86 所示。在 Edges 黄色高亮输入框中选择 4 条径向的直线，保持 Ratio（比例）为 1，改变划分方式为 Interval count（分段数形式），并在其左侧的数据输入框中输入“8”，单击 Apply 按钮。同样，4 条圆弧线也用相同的方法划分为 8 段，所得线网格如图 2-87 所示。

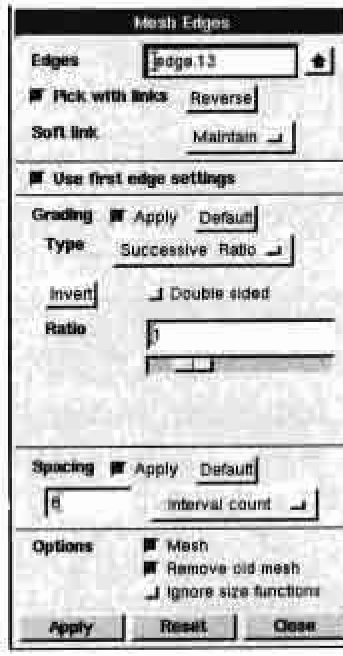


图 2-86　Mesh Edges 面板

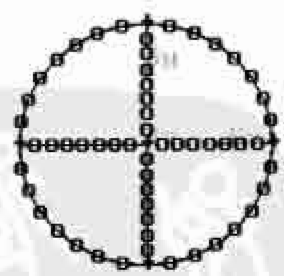


图 2-87　划分好的线网格

（12）依次单击、按钮，弹出如图 2-88 所示的 Mesh Faces 面板，在 Faces 黄色高亮输入框中选择一个 1/4 圆弧面，选择网格形式为 Quad（四边形），并选择划分类型为 Tri Primitive（将一个三角形区域划分为 3 个四边形区域），保持其余的默认设置（由于包围面的所有线网格已有划分，此时不要再选择面的划分形式），单击 Apply 按钮，得到如图 2-89 所示的面网格。

（13）采用同样的面网格划分方法将其

余的 3/4 圆面划分网格，得到如图 2-90 所示的整个圆面的网格。

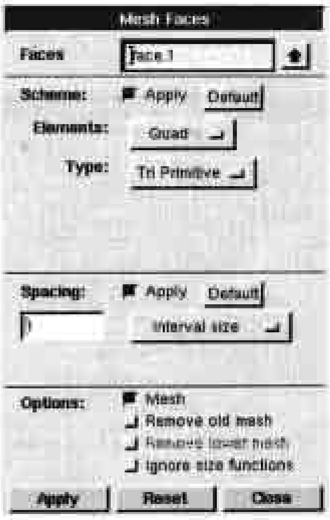


图 2-88　Mesh Faces 面板

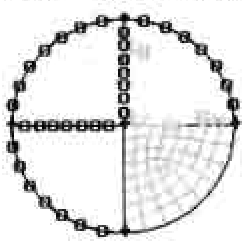


图 2-89　1/4 圆弧面的面网格

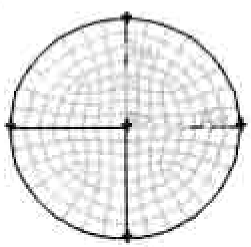


图 2-90　整个圆面的网格

（14）需要将该面作为源面，拉伸生成整个圆柱体。依次单击、按钮，右击 Volume 面板中的按钮，在弹出的下拉列表中选择选项，如图 2-91 所示。

（15）在弹出的 Sweep Faces 面板中的 Faces 黄色高亮输入框中选择 4 个圆弧面，改变 Path（路径）为 Vector（坐标矢量），如图 2-92 所示。单击 Define 按钮，弹出如图 2-93 所示的 Vector Definition（矢量定义）面板，选中 Direction 栏中 Z 后的 Positive 单选按钮，即将拉伸方向定义为 Z 轴的方向。然后，选中 Magnitude 复选框，并在右侧的数据输入框中输入“1”，即表示要沿 Z 轴拉伸 1m，单击 Apply 按钮，退出 Vector Definition 面板。回到 Sweep Faces 面板后，选中 With mesh 复选框，表示要连同网格一起拉伸，单击 Apply 按钮。此时，生成了所要的圆柱体，且网格也已经存在，但是 GAMBIT 默认的拉伸方向网格间隔尺寸为 1，所以看到 Z 轴方向只有一个网格，如图 2-94 所示。

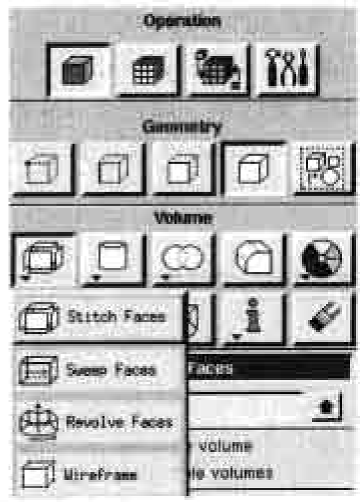


图 2-91　选择面拉伸成体的方式

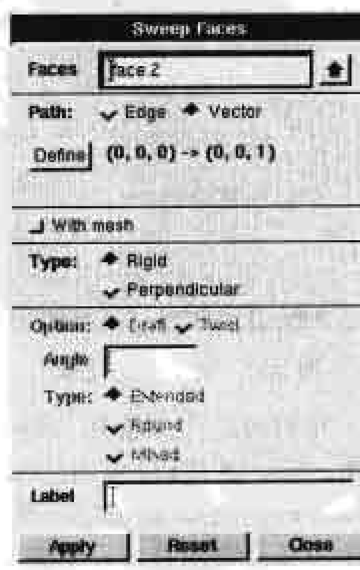


图 2-92　Sweep Faces 面板

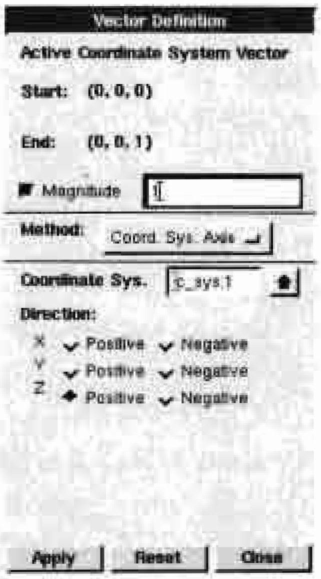


图 2-93　Vector Definition 面板

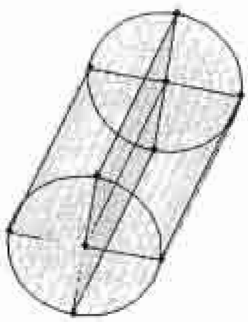


图 2-94　拉伸得到的圆柱体

（16）此时的体网格质量很差，不能用于后续的模拟计算，故需要将 Z 轴方向进行适当的分段，依次单击、、按钮，弹出如图 2-95 所示的 Mesh Edges 面板，在 Edges 黄色高亮输入框中选择 Z 轴方向的 5 条直线，保持 Ratio（比例）为 1，改变划分方式为 Interval count，并在其左侧的数据输入框中输入“20”，即将三维圆柱体的 Z 轴方向分成 20 段，单击 Apply 按钮，得到如图 2-96 所示的线网格，此时由于线网格发生了变化，体网格自动删除。

（17）依次单击、、按钮，弹出如图 2-97 所示的 Mesh Volumes 面板，在 Volumes 黄色高亮输入框中选择 4 个 1/4 圆柱体，保持网格划分形式为 Hex/Wedge（主要是六面体网格形式，在适当位置包含楔形网格），保持划分方式为 Cooper（将几何体按照指定源面进行网格划分），单击 Apply 按钮，得到如图 2-98 所示的三维圆柱体体网格，此时的体网格相对较密，达到了数值模拟的要求。

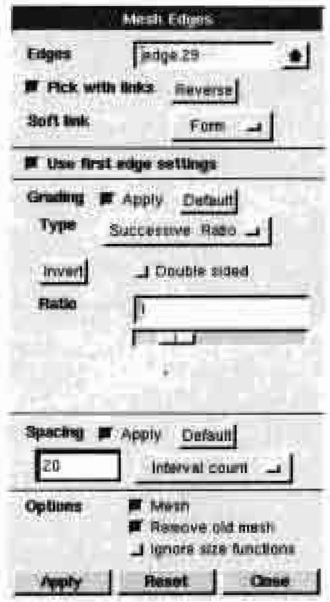


图 2-95　Mesh Edges 面板



图 2-96　圆柱体线网格

（18）定义问题的边界类型。为避免网格对定义的干扰，可以先将网格显示关闭，单击视图控制面板中的按钮，弹出如图 2-99 所示的 Specify Display Attributes 面板，选中 Mesh 右侧的 Off 单选按钮，即可将网格显示

关闭，单击 Apply 按钮。

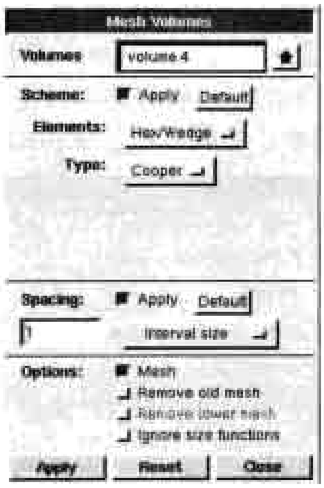


图 2-97　Mesh Volumes 面板

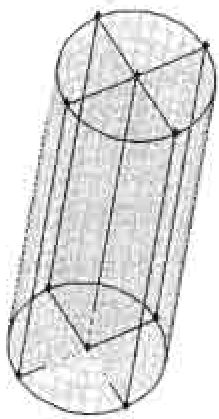


图 2-98　圆柱体体网格

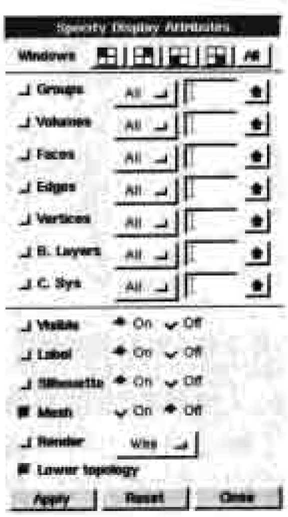


图 2-99　Specify Display Attributes 面板

（19）依次单击、按钮，弹出如图 2-100 所示的 Specify Boundary Types 面板。在 Name 文本输入框中输入要定义边界的名称，先输入“in”（表示定义进口），设置其 Type 为 PRESSURE_INLET（压力入口边界），设置 Faces 为 *XOY* 平面上的圆面（最初的 4 个 1/4 圆弧），单击 Apply 按钮。接着，在 Name 文本输入框中输入 out（表示定义出口），设置其 Type 为 PRESSURE_OUTLET（压力出口边界），设置 Faces 为 Z=1 平面上的圆面，单击 Apply 按钮。最后，在 Name 文本输入框中输入“bimian”（壁面），设置其 Type 为 WALL，设置 Faces 为圆柱体的侧面，单击 Apply 按钮。

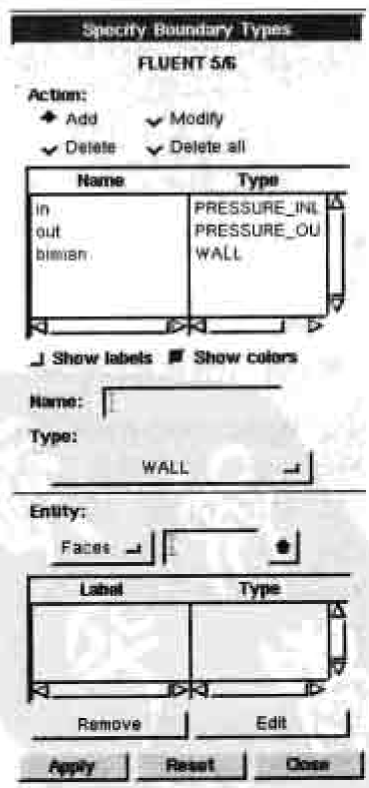


图 2-100　Specify Boundary Types 面板

（20）选择菜单栏中的 File→Export→Mesh 命令，弹出如图 2-101 所示的网格输出（Export Mesh File）对话框。保持 File Name 为 2-5.msh，并保持左下侧的 Export 2-D(X-Y)

Mesh 复选框未选中（此时是三维的网格），单击 Accept 按钮，直到文本显示框 Transcript 最后一行出现“Mesh was successfully written to 2-5.msh.”语句。

（21）最后选择 File→Exit 命令，安全退出 GAMBIT。



图 2-101 Export Mesh File 对话框

2.6 实例·练习——三维同心环空柱体

前面绘制了三维圆柱体，若将大圆柱体中间减去一个小圆柱体则变成环空柱体，这在换热器、石油管柱中经常遇到，如图 2-102 所示，那么此类环空柱体的模型与网格该如何绘制呢？下面就以三维同心环空柱体为例进行介绍，其尺寸如图 2-103 所示。

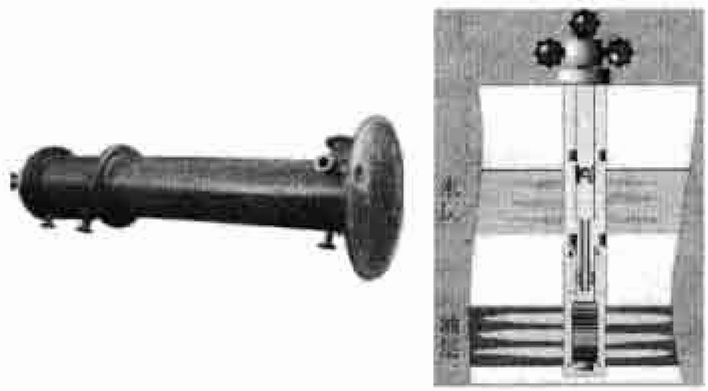


图 2-102 环空柱体

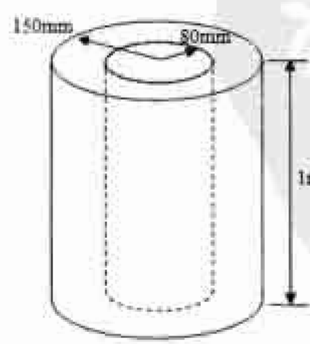


图 2-103 同心环空柱体尺寸

【思路分析】

同心环空柱体有大小两个圆柱体布尔减得到，几何模型建立相对简单。若要得到较高质量的网格，则需要将柱体进行切割，这里介绍与实例·操作不同的划分方法。首先建立一个辅助的平面，将环空柱体切割成两半，然后对每一半分别进行网格的划分，划分顺序为由线到面再到体，得到整个环空柱体的网格，最后定义边界类型。模型建立及网格划分流程如图 2-104 所示。



图 2-104　三维同心环空柱体建模及网格划分流程图

【光盘文件】

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch2\2-6.msh 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch2\2-6.avi 文件。

【操作步骤】

（1）选择菜单栏中的 File→New 命令，弹出 Create New Session 对话框，如图 2-105 所示。在 ID 和 Title 文本输入框中输入“2-6”，取消选中 Save current session 复选框（若选中，其左侧按钮将显示为红色），单击 Accept 按钮。

（2）依次单击、按钮，在 Volume 面板中右击按钮，弹出如图 2-106 所示的下拉列表，选择其中的选项。

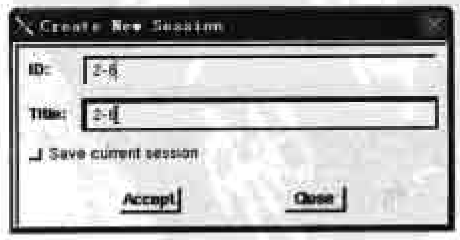


图 2-105　Create New Session 对话框

（3）在弹出的如图 2-107 所示的 Create Real Cylinder 面板的 Height 数据输入框中输

入“1”，在 Radius 1 数据输入框中输入“0.15”，保持 Radius 2 为空白（即默认柱体的上下圆面半径一致），选择 Axis Location 为 Positive Z（即选中柱体轴向为 *Z* 轴方向），单击 Apply 按钮，生成大圆柱体。按同样的方法可生成小圆柱体，如图 2-108 所示。

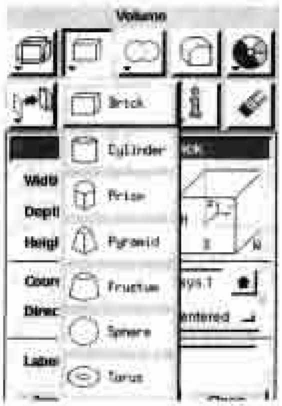


图 2-106　几何体样式列表

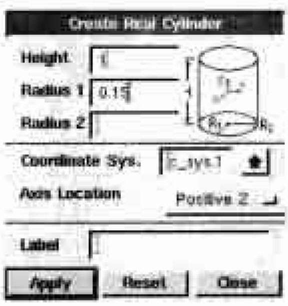


图 2-107　Create Real Cylinder 面板

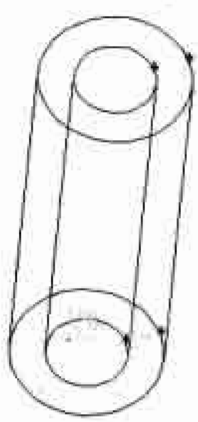


图 2-108　生成的大小柱体

（4）单击 Volume 面板中的按钮，在弹出的如图 2-109 所示的 Subtract Real Volumes 面板中的 Volume 黄色高亮输入框中选择大柱体，在 Volumes 黄色高亮输入框中选择小柱体，单击 Apply 按钮，得到环空柱体，如图 2-110 所示。

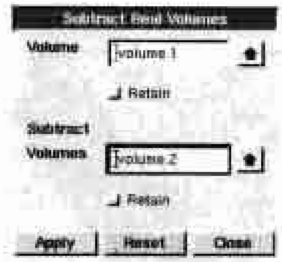


图 2-109　Subtract Real Volumes 面板



图 2-110　环空柱体

（5）绘制用于切割柱体的平面。依次单击、、按钮，弹出如图 2-111 所示的 Create Real Rectangular Face 面板，在 Width 和 Height 数据输入框中均输入“2”，改变 Direction 为 ZX Centered（表示将平面建立在 *XOZ* 平面上，且以原点为面的中心），单击 Apply 按钮，得到辅助平面，如图 2-112 所示。

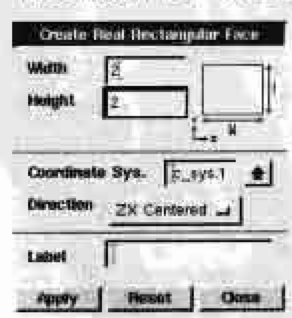


图 2-111　Create Real Rectangular Face 面板

（6）依次单击、、按钮，弹出如图 2-113 所示的 Split Volume 面板，在 Volume

黄色高亮输入框中选择环空柱体，改变 Split With 为 Faces(Real)，选择 Faces 为刚建立的辅助面，单击 Apply 按钮，得到分为两半的柱体，如图 2-114 所示。



图 2-112　生成的辅助面

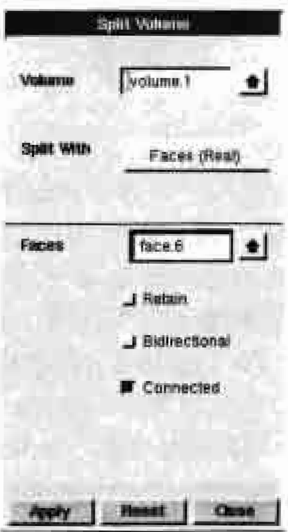


图 2-113　Split Volume 面板



图 2-114　分割后的两半柱体

（7）依次单击、、按钮，弹出如图 2-115 所示的 Mesh Edges 面板，在 Edges 黄色高亮输入框中选择两半环空柱体衔接处的 4 条径向直线，保持 Ratio（比例）为 1，改变划分方式为 Interval count，并在其左侧的数据输入框中输入“6”，单击 Apply 按钮。接着按照同样的线网格划分方法，将 Z 轴方向的 4 根直线分为 40 段，将柱体圆面上的所有半圆弧分为 10 段，得到如图 2-116 所示的线网格。

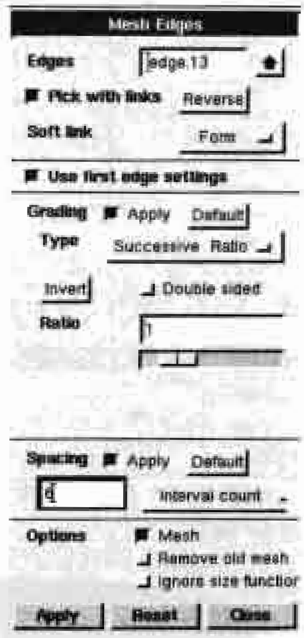


图 2-115　Mesh Edges 面板



图 2-116　线网格

（8）依次单击、、按钮，弹出如图 2-117 所示的 Mesh Faces 面板，在 Faces 黄色高亮输入框中选择柱体上下圆面（共 4 个 1/2 的圆弧面），设置 Elements 为 Quad（四边形）网格形式，设置 Type 为 Map 方式（即将区域划分为四边形的结构性网格），保持其余默认设置，单击 Apply 按钮，得到如图 2-118 所示的圆弧面网格。按照同样的方法，可以进行柱体内外侧面（共 4 个内外侧面）的面网格划分，还可以将两个半柱体衔接的两个轴向剖面进行面网格划分，最后得到的面网格如图 2-119 所示。

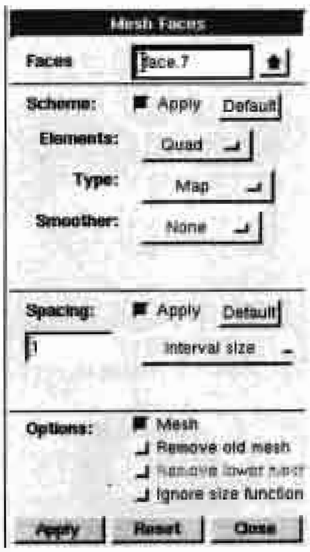


图 2-117 Mesh Faces 面板



图 2-118 圆弧面网格

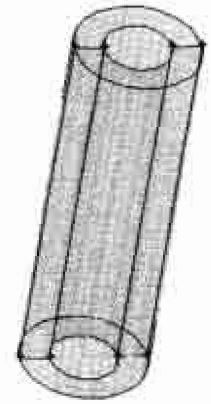


图 2-119 面网格

（9）依次单击、、按钮，弹出如图 2-120 所示的 Mesh Volumes 面板，在 Volumes 黄色高亮输入框中选择两个半环空柱体，设置 Elements 为 Hex（六面体）网格形式，设置 Type 为 Map 方式（即将体划分为六面体结构化网格），保持其余默认设置，单击 Apply 按钮，得到环空柱体的体网格。为了能够观察体网格的分布及区别前述的面网格，可以单击视图控制面板右下角的按钮，在弹出的 Examine Mesh 面板中选择 Plane，选中 3D Element 右侧的六面体网格，然后将 Cut Orientation 栏中的“+”选中，并将 X、Y、Z 的滚动栏都拖至最左端，此时视图窗口中将呈现出清晰的体网格，如图 2-121 所示。

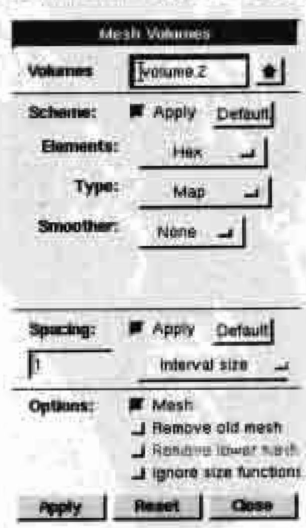


图 2-120 Mesh Volumes 面板



图 2-121　体网格

（10）定义柱体的边界类型。依次单击■、■按钮，弹出如图 2-122 所示的 Specify Boundary Types 面板。

在 Name 文本输入框中输入“in”，设置 Type 为 PRESSURE_INLET，设置 Faces 为 *XOY* 平面上的圆环面，单击 Apply 按钮。接着在 Name 文本输入框中输入“out”，设置 Type 为 PRESSURE_OUTLET，设置 Faces 为 Z=1 平面上的圆环面，单击 Apply 按钮。最后在 Name 文本输入框中输入“bimian”（壁面），设置 Type 为 WALL，设置 Faces 为环空柱体的侧面，单击 Apply 按钮。若选中 Show colors 复选框，则可以用颜色区别显示已定义好的边界类型，如图 2-123 所示。

（11）选择 File→Export→Mesh 命令，弹出网格输出对话框。保持 File Name 为 2-6.msh，并保持左下侧的 Export 2-D(X-Y)Mesh 复选框未选中，单击 Accept 按钮，输出网格文件。

（12）最后选择 File→Exit 命令，安全退出 GAMBIT。

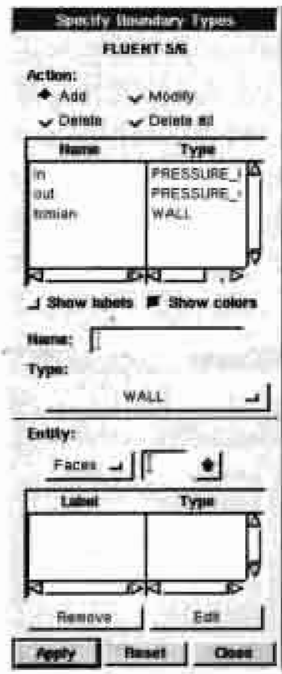


图 2-122　Specify Boundary Types 面板



图 2-123　边界类型色彩显示

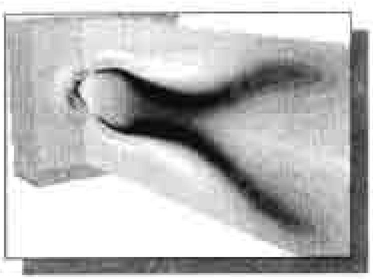
第 3 讲 湍流模型

湍流广泛存在于自然界中，大气与海洋环境的流动，飞机与轮船的绕流，高速管流，叶轮机械、化学反应器及核反应器中的流体运动都是湍流。正是由于湍流特性在工程中占有重要的地位，所以湍流研究一直被研究者高度重视。湍流流动的核心特征是其在物理上近乎于无穷多的尺度和数学上强烈的非线性，这使得人们无论是通过理论分析、实验研究还是计算机模拟来彻底认识湍流都非常困难。随着计算机技术和数值算法技术的不断发展，数值模拟相比其他方法更具可操作性，但仍需要我们继续探求高精度的计算方法和实用可靠的网格生成技术，在研究湍流机理的同时，建立相应的计算模式，从而进行更高精度的模拟。

本讲主要介绍几种常用的湍流模型方程，并通过 3 个实例介绍如何在 FLUENT 12 中进行湍流流动的模拟。

本讲内容

- 实例·模仿——90° 弯管内水的流动
- 湍流模型控制方程
- 湍流模型设置
- 实例·操作——偏心大小头渐扩管内油品流动
- 实例·练习——气体流经节流嘴的流动





3.1 实例·模仿——90° 弯管内水的流动

工程管道中经常因地形或特殊需要而设置弯管段，如图 3-1 所示。流体在弯管段中的流动与直管段有极大的不同，那么，弯管内的流体速度、压强是如何分布的呢？是否会造成二次流？是否会因此导致弯管振动从而破坏管道？这些都是设计管道弯管段和控制管道流量的关键参数。下面介绍利用 FLUENT 12 的湍流模型进行 90° 弯管内水流流动的模拟，管道入口流速为 2m/s，弯管尺寸如图 3-2 所示。

【思路分析】

在 GAMBIT 中建立弯管几何模型，然后划分网格，并导出网格文件，在 FLUENT 12 中导

入网格后，进行模型的设置，尤其是湍流模型，可选用标准的 k-ε 模型，定义合适的边界参数后即可迭代求解，整个流程如图 3-3 所示。

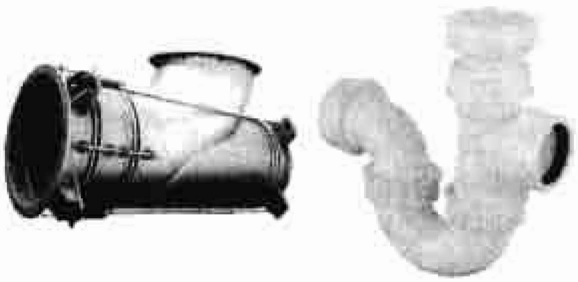


图 3-1 工业管道中的弯管

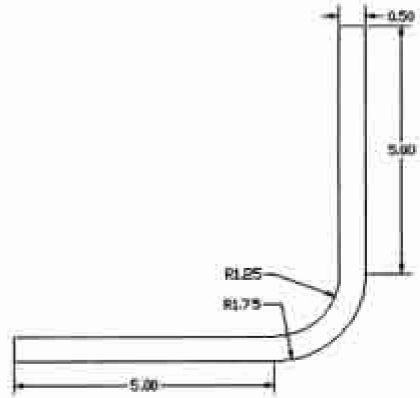


图 3-2 弯管几何尺寸（单位：m）



图 3-3 弯管水流模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch3\3-1.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch3\3-1.cas，3-1.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch3\3-1.avi 文件。

【操作步骤】

（1）双击桌面上的 FLUENT 图标，在弹出的 FLUENT Launcher 界面中选择 Dimension 为 3D，即三维问题，如图 3-4 所示。单击 OK 按钮，打开 FLUENT 12。

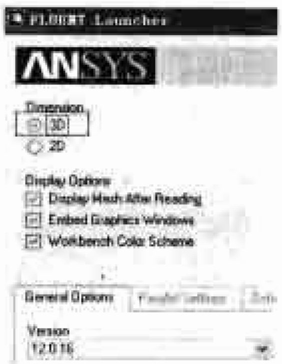


图 3-4　启动 3D 解算器

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，如图 3-5 所示，在弹出的 Select File 对话框中找到 3-1.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中。导入后，FLUENT 的视图窗口会自动出现研究问题的网格，如图 3-6 所示。



图 3-5　选择菜单命令

（3）选择操作面板 Problem Setup 下的 General 选项，进行问题的基本设置，如图 3-7 所示。单击 Scale 按钮，即弹出如图 3-8 所示的 Scale Mesh 对话框，用户可从中设置模型的尺寸，或根据单位进行尺寸的放大或缩小，本例在 GAMBIT 中建模时即用标准单位 m，因此，此处无须额外设置，单击 Close 按钮即可。



图 3-6　导入后自动呈现网格

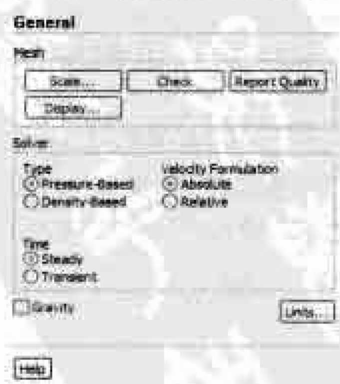


图 3-7　General 面板

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，可实现网格的检查，文本中同时呈现出网格检查的信息及结果，待最后出现 Done，且无 Warn 语句时，表示模型网格是合

适的，如图 3-9 所示。若出现 Warn 语句，则需要查找网格文件的错误之处，返回 GAMBIT 中进行适当修改后再次导入 FLUENT 中进行检查。

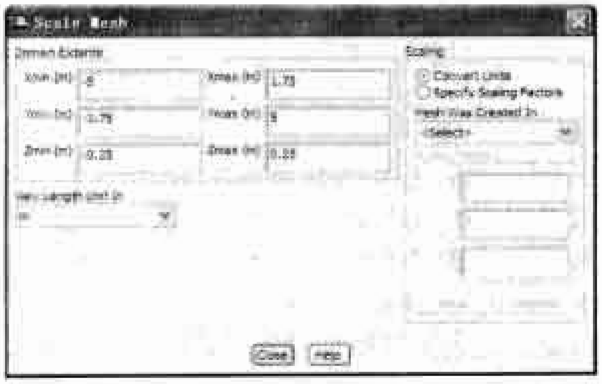


图 3-8 Scale Mesh 对话框

```
Checking closed cells.
Checking contact points.
Checking element type consistency.
Checking boundary types:
Checking face pairs.
Checking wall distance.
Checking node count.
Checking nosolve cell count.
Checking nosolve face count.
Checking face children.
Checking cell children.
Checking storage.
Done.
```

图 3-9 网格检查信息

（5）Solver 栏中的选项用于基本模型的设置，这里保持选中压力基（Pressure-Based）、绝对速度（Absolute）、定常流（Steady）单选按钮。

（6）选中 General 面板中的 Gravity 复选框，展开重力加速度的设置，这里设置 Y 方向有重力加速度，输入“-9.8”，如图 3-10 所示。



图 3-10 设置重力加速度

（7）下面即可开始设置具体模型了。选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，展开如图 3-11 所示的 Models 面板。可见，此时的相关模型都处于关闭状态（Off）。这里要调用湍流模型，方法为双击 Viscous-Laminar（未设置湍流模型时，FLUENT 默认为层流模型），弹出如图 3-12 所示的 Viscous Model 对话框，选中 k-epsilon(2 eqn)单选按钮，对话框展开如图 3-13 所示。选中 k-epsilon Model 栏中的 Standard（标准模型）单选按钮，保持 Model Constants 栏中的参数不变，单击 OK 按钮。

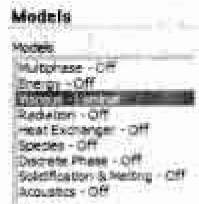


图 3-11 Models 操作面板

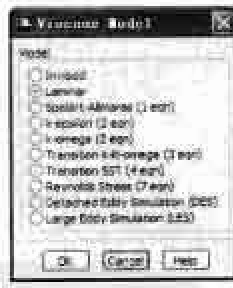


图 3-12 Viscous Model 对话框

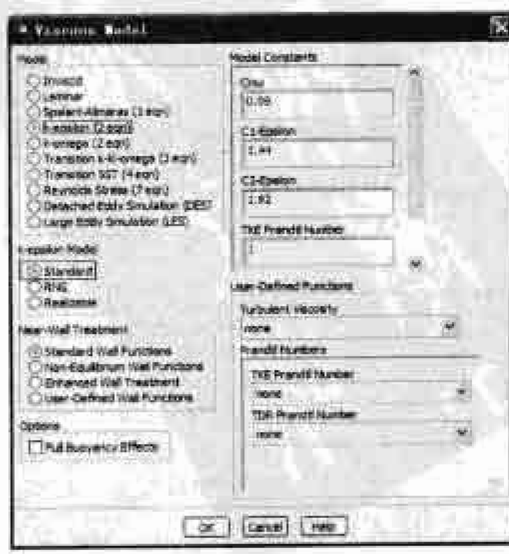


图 3-13 具体模型设置

（8）选择 Problem Setup 下的 Materials 选项，FLUENT 默认的流体材料为空气，固体材料为铝，如图 3-14 所示。这里需要使用的材料为水，所以单击 Materials 面板中的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，如图 3-15 所示。单击 FLUENT Database 按钮，弹出如图 3-16 所示的 FLUENT Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表框中的 water-liquid(h2o<l>) 选项，单击 Copy 按钮，即可将 FLUENT 自带材料数据库中的水调用到当前工程中。回到 Create/Edit Materials 对话框，即可看到流体材料（FLUENT Fluid Materials）下拉列表框中已经有水。单击 Close 按钮，关闭 Create/Edit Materials 对话框。



图 3-14　默认材料

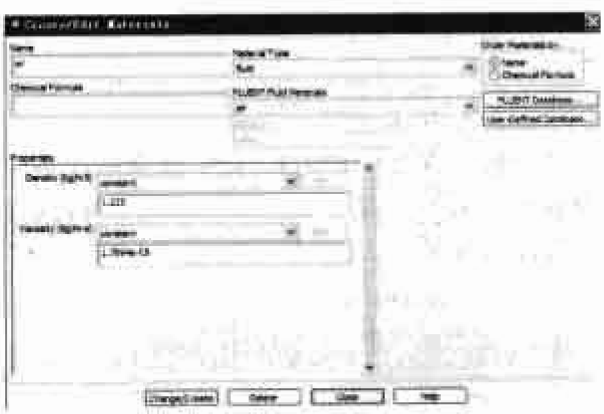


图 3-15　Create/Edit Materials 对话框

（9）选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，可以看到 Boundary Conditions 面板中已存在的边界名称（在 GAMBIT 中已定义好），如图 3-17 所示。这里有进、出口和壁面 3 个边界，首先选中 in 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 3-18 所示的 Velocity Inlet 对话框，设置 Velocity Magnitude(m/s)为 2，即表示入口流速为 2m/s，设置 Turbulence 方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，其中 Turbulent Intensity(%)为 1，Hydraulic Diameter(m)为 0.5，单击 OK 按钮。接着选中 out 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 3-19 所示的 Outflow 对话框，保持 Flow Rate Weighting 为 1，即进口流入流体均从该出口流出，符合质量守恒，单击 OK 按钮。最后选中 wall 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 3-20 所示的 Wall 对话框，设置壁面粗糙度（Wall Roughness）的 Roughness Height(m)为 0.00004572，单击 OK 按钮。



图 3-16　FLUENT Database Materials 对话框

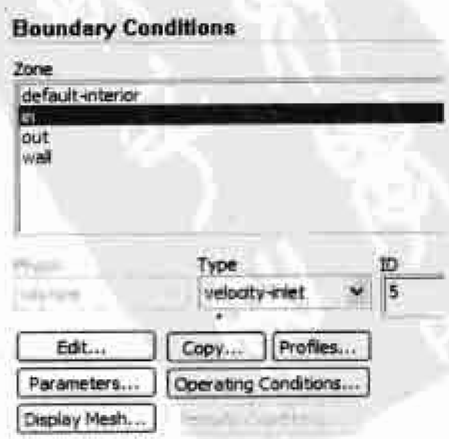


图 3-17　Boundary Conditions 面板



图 3-18 Velocity Inlet 对话框



图 3-19 Outflow 对话框



图 3-20 Wall 对话框

（10）选择 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，展开如图 3-21 所示的 Cell Zone Conditions 面板，单击 Edit 按钮，弹出如图 3-22 所示的 Fluid 对话框，在 Material Name 下拉列表框中选择 water-liquid 选项，单击 OK 按钮，即将管内流动的流体定义为水。

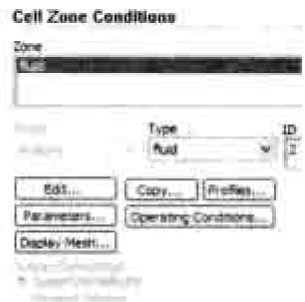


图 3-21 Cell Zone Conditions 面板



图 3-22 Fluid 对话框

（11）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，即可展开如图 3-23 所示的面板，在其中可进行压力-速度耦合算法设置及压强、动量、能量方程的离散格式设置等，这里保持默认设置。

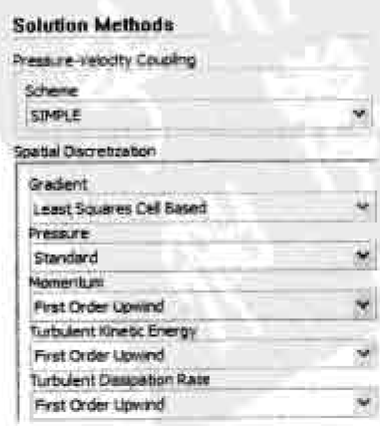


图 3-23 算法设置

（12）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，即可展开如图 3-24 所示的 Solution Controls 面板，用户可在其中设置相关参数的松弛因子，这里也保持默认设置。

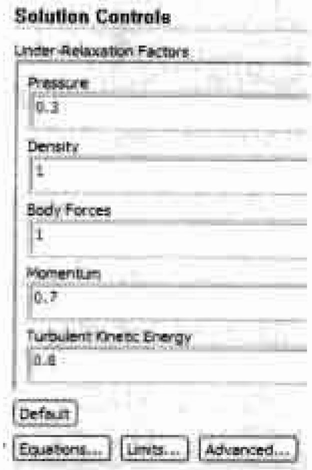


图 3-24　松弛因子设置

（13）接下来就可以将问题初始化了，选择操作面板中 Solution 下的 Solution Initialization 选项，选择展开面板中的 Compute from 为 in，单击 Initialize 按钮，完成计算初始化，如图 3-25 所示。

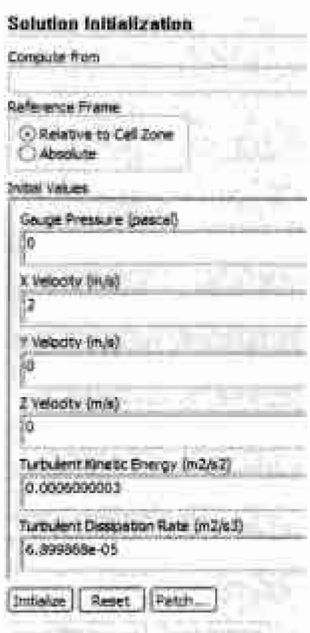


图 3-25　初始化

（14）初始化完成后就可以开始迭代计算，选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 3-26 所示的面板中设置 Number of Iterations 为 1000，单击 Calculate 按钮即开始计算，计算过程中会出现计算过程对话框，待对话框中出现 Calculating Completed 时，则表示计算结束。

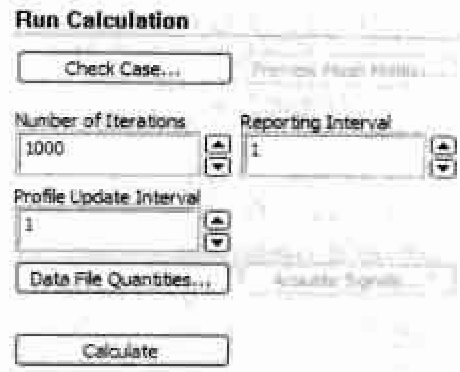


图 3-26　迭代次数设置

（15）计算结束后，在视图窗口中可以看到计算过程的残差曲线，如图 3-27 所示。

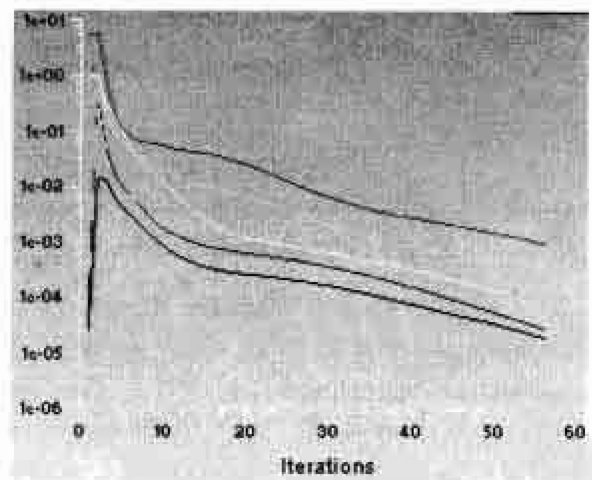


图 3-27　残差曲线

（16）为了能够显示计算结果，需要定义一个面，选择菜单栏中的 Surface→Plane 命令，如图 3-28 所示，弹出 Plane Surface 对话框，可以利用 3 点生成一个面，在 Points 栏中输入 3 点坐标，并定义 New Surface Name 为 zh，如图 3-29 所示，单击 Create 按钮生成

弯管的轴向剖面。

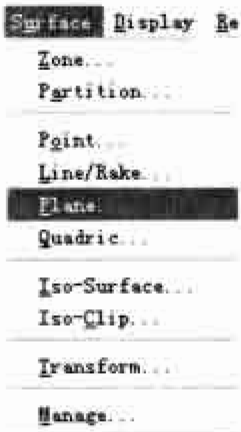


图 3-28　建立面操作菜单

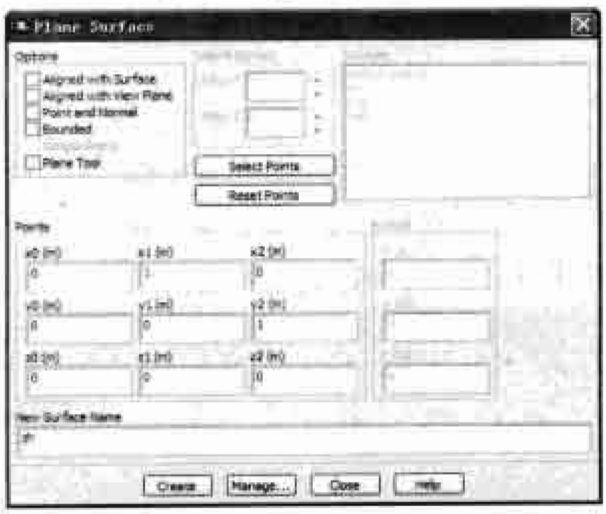


图 3-29　Plane Surface 对话框

（17）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的 Graphics and Animations 面板中双击 Contours 选项，如图 3-30 所示。此时，弹出如图 3-31 所示的 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中的下拉列表框中分别选择 Pressure...和 Static Pressure 选项，并选择显示的面为 zh，单击 Display 按钮，即可看到如图 3-32 所示的压强云图。若在 Contours of 栏中的下拉列表框中分别选择 Velocity...和 Velocity Magnitude 选项，则会出现如图 3-33 所示的速度云图。

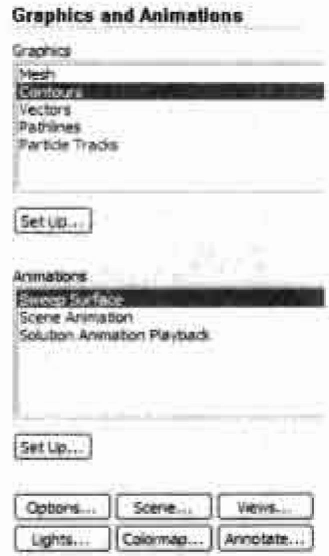


图 3-30　Graphics and Animations 面板



图 3-31　Contours 对话框



图 3-32　压强云图

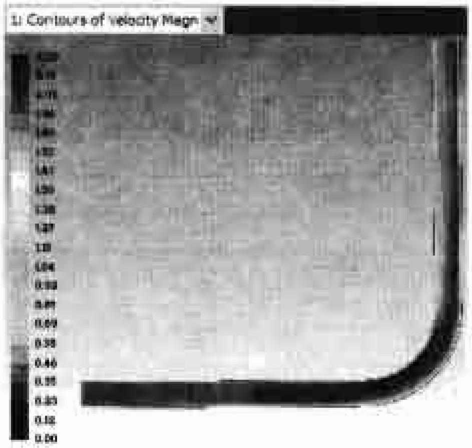


图 3-33　速度云图

（18）若双击 Graphics and Animations 面板中的 Vectors 选项，则会弹出如图 3-34 所示的 Vectors 对话框，选择显示面为 zh，其他选项保持默认，单击 Display 按钮，则得到如图 3-35 所示的速度矢量图。



图 3-34　Vectors 对话框

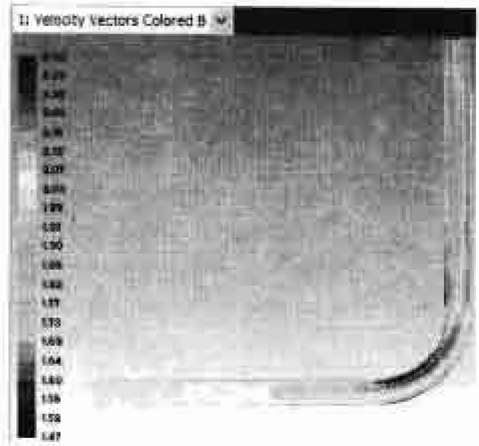


图 3-35　速度矢量图

（19）图形分析完后，选择菜单栏中的 File→Write→Case & Data 命令，如图 3-36 所示，保存工程与数据结果文件（3-1.cas 和 3-1.dat）。

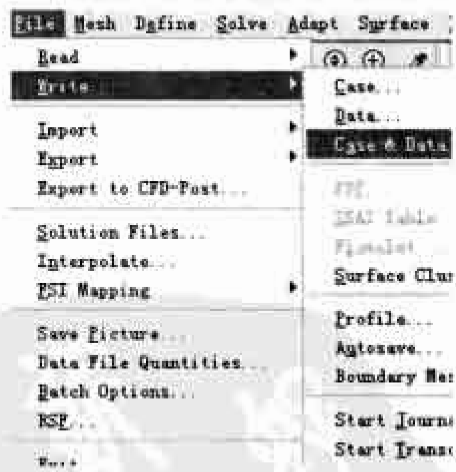


图 3-36　输出工程及数据文件

（20）选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。若不按此方法则会生成垃圾文件。

3.2　湍流模型控制方程

湍流模型很多，常见的有单方程（Spalart-Allmaras）模型、*k*-ε 模型、雷诺应力（RSM）模型、大涡模拟（LES）模型等，其特点及适用范围如表 3-1 所示。

表 3-1 湍流模型列表

模型		特点及适用范围
S-A 模型		大网格低成本湍流模型，适用于模拟中等复杂的内流和外流以及压力梯度下的边界层流动
k-ε 模型	标准	优缺点明确，适用于初始迭代、设计选型和参数研究
	重整化	适用于涉及快速应变、中等涡和局部转捩的复杂剪切流动
	可实现	计算精度高于重整化 k-ε 模型
RSM 模型		基于雷诺平均的湍流模型，避免各向同性涡粘性假设，需要较多的 CPU 时间和内存消耗，适用于模拟强漩涡流等复杂三维流动
LES 模型		适用于模拟瞬态的大尺度涡
V2F 模型		模拟近壁面边界层、自由剪切和低雷诺数流动时性能较好，结合了近壁湍流各向异性和非局部压力应变效应
分离涡模型		改善了大涡模拟的近壁处理，比 LES 模型更实用

3.2.1 S-A 模型

湍流时均连续性方程与雷诺方程如下：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{3-1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\rho\overline{u_i' u_j'}\right)+S_i \tag{3-2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j\phi)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma\frac{\partial \phi}{\partial x_j}-\rho\overline{u_j'\phi'}\right)+S \tag{3-3}$$

式中：ρ 为流体密度，kg/m^3；u 为流速，m/s；μ 为流体动力粘度，Pa·s；ϕ、Γ 为流体参数；S 为源项。

单方程模型是在湍流时均连续性方程与雷诺方程的基础之上，再建立一个湍动能 k 的输运方程，将湍动粘度 μ_t 表示成 k 的函数，从而使方程组封闭。湍动能 k 的输运方程为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\rho C_D\frac{k^{3/2}}{l} \tag{3-4}$$

式中：σ_k、C_D、C_μ 为经验常数，$\sigma_k=1$，$C_\mu=0.09$，$C_D=0.08\sim0.38$。

从左至右，方程式（3-4）中各项依次为瞬态项、对流项、扩散项、产生项、耗散项，由普朗特表达式得：

$$\mu_t=\rho C_\mu\sqrt{k}l \tag{3-5}$$

单方程模型中混合长度 l 不易确定，因此很难得到推广应用。

3.2.2 k-ε 模型

k-ε 模型为双方程模型，是在一方程模型的基础之上，再引入一个关于湍动耗散率 ε 的方程。k-ε 模型又分为标准、重整化和可实现 3 种，最常用的是标准 k-ε 模型，随后根据实际问题的复杂性及精度需要，出现了重整化和可实现的 k-ε 模型。

1. 标准 k-ε 模型

在湍动能 k 方程的基础上，引入一个湍动耗散率 ε 的方程，形成了 k-ε 双方程模型，称为标准 k-ε 模型。该模型于 1972 年由 Launder 和 Spalding 提出。模型中的 ε 定义为：

$$\varepsilon=\frac{\mu}{\rho}\overline{\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\right)\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\right)} \tag{3-6}$$

于是，湍动粘度 μ_t 可表示成 k 与 ε 的函数：

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3-7}$$

因此，标准 k-ε 模型的输运方程为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k \tag{3-8}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \tag{3-9}$$

其中：

$$\begin{cases} G_k=\mu_t\left(\dfrac{\partial u_i}{\partial x_j}+\dfrac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\dfrac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ G_b=\beta g_i\dfrac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_t}\dfrac{\partial T}{\partial x_i} \\ \quad\beta=-\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial\rho}{\partial T} \\ Y_M=2\rho\varepsilon M_t^2 \\ \quad M_t=\sqrt{k/a^2} \\ \quad a=\sqrt{\gamma RT} \end{cases} \tag{3-10}$$

式中：G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能产生；G_b 是由于浮力影响引起的湍动能产生；Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响；$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$、$C_{3\varepsilon}$ 为经验常数，FLUENT 中默认值为 $C_{1\varepsilon}$=1.44、$C_{2\varepsilon}$=1.92、$C_{3\varepsilon}$=0.09；σ_k、σ_ε 分别为湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数，FLUENT 中默认值为 σ_k=1.0、σ_ε=1.3；Pr_t 为湍动普朗特数，默认取 Pr_t=0.85；g_i 为重力加速度在 i 方向上的分量；β 为热膨胀系数；M_t 为湍动马赫数；a 为声速。

标准 k-ε 模型中湍动能的输运方程是通过精确方程推导得到的，但耗散率的方程是通过物理推理及数学上模拟相似原形方程得到的。该模型假设流动为完全湍流，分子粘性的影响可以忽略，因此，标准 k-ε 模型只适合完全湍流的流动过程模拟。

2. 重整化 k-ε 模型

重整化 k-ε 模型（RNG k-ε 模型）是由 Yakhot 和 Orzag 提出的，它是对瞬时 N-S 方程用重整化的数学方法推导出来的模型。模型中的常数与标准 k-ε 模型不同，而且方程中也出现了新的函数或项。所得到的湍动能和耗散率方程与标准 k-ε 模型相似，为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\alpha_k\mu_{eff})\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M \tag{3-11}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\alpha_\varepsilon\mu_{eff}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left(G_k+C_{3\varepsilon}G_b\right)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}-R \tag{3-12}$$

其中：

$$\begin{cases}\mu_{eff}=\mu+\mu_t\\ \mu_t=\rho C_\mu\dfrac{k^2}{\varepsilon}\end{cases} \tag{3-13}$$

式中：G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能产生；G_b 是由于浮力影响引起的湍动能产生；Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响，这些参数与标准 k-ε 模型中的参数相同；α_k、α_ε 分别为湍动能和耗散率的有效普朗特数的倒数；对于高雷诺数问题，C_μ=0.0845。

重整化 k-ε 模型主要针对的是高雷诺数流动问题，对于低雷诺数问题则需要进行相应的设置。

3. 可实现 k-ε 模型

对于时均应变率特别大的情形，标准 k-ε 模型有可能导致负的正应力。为使流动符合湍流的物理定律，需要对正应力进行某种数学约束。可实现 k-ε 模型（Realizable k-ε 模型）正是基于此原理提出的，其湍动能及耗散率输运方程为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M \tag{3-14}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+\rho C_1 E\varepsilon-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\upsilon\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b \tag{3-15}$$

其中：

$$\begin{cases}C_1=\max\left(0.43,\dfrac{\eta}{\eta+5}\right)\\ \quad\eta=\left(2E_{ij}E_{ij}\right)^{1/2}\dfrac{k}{\varepsilon}\\ \quad E_{ij}=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial u_i}{\partial x_j}+\dfrac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\\ \mu_t=\rho C_\mu\dfrac{k^2}{\varepsilon}\\ \quad C_\mu=\dfrac{1}{A_0+A_S U^* k/\varepsilon}\\ \qquad A_S=\sqrt{6}\cos\phi\\ \qquad \phi=\dfrac{1}{3}\cos^{-1}\left(\sqrt{6}W\right)\\ \qquad W=\dfrac{E_{ij}E_{jk}E_{kj}}{\left(E_{ij}E_{ij}\right)^{1/2}}\\ \qquad U^*=\sqrt{E_{ij}E_{ij}+\ddot{\Omega}_{ij}\ddot{\Omega}_{ij}}\\ \qquad \ddot{\Omega}_{ij}=\Omega_{ij}-2\varepsilon_{ijk}\varpi_k\\ \qquad \Omega_{ij}=\overline{\Omega_{ij}}-\varepsilon_{ijk}\varpi_k\end{cases} \tag{3-16}$$

式中：G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能产生；G_b 是由于浮力影响引起的湍动能产生；Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响；$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$、$C_{3\varepsilon}$、C_2、A_0 为经验常数，FLUENT 中默认值为 $C_{1\varepsilon}$=1.44、$C_{2\varepsilon}$=1.92、$C_{3\varepsilon}$=0.09、C_2=1.9、A_0=4.0；σ_k、σ_ε 分别为湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数，FLUENT 中默认值为 σ_k=1.0、σ_ε=1.3。

该模型适合的流动类型比较广泛，包括有旋均匀剪切流、自由流、腔道流动、边界层流动和有分离的流动等。

双方程模型中，无论是标准 k-ε 模型、RNG k-ε 模型还是 Realizable k-ε 模型，都有类似的形式，即都有湍动能和耗散率的输运方程，区别在于：计算湍流粘性的方法不同；控制湍流扩散的湍流普朗特数不同；耗散率方程中的产生项和 G_k 关系不同。

3.2.3 RSM 模型

上面介绍的各种双方程模型都采用各向同性的湍流粘度来计算湍流应力，这些模型很难模拟出旋转流动及流动方向表面曲率变化的影响。为克服这些缺点，有必要直接对雷诺方程中的湍流脉动应力建立微分方程式并进行求解。

雷诺应力模型（RSM 模型）就是求解雷诺应力张量的各个分量的输运方程，具体形式为：

$$\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\overline{u_iu_j}\right)+\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\rho U_k\overline{u_iu_j}\right)=-\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\overline{\rho u_iu_ju_k}+\overline{p\left(\delta_{kj}u_i+\delta_{ik}u_j\right)}\right]\\&+\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\mu\frac{\partial}{\partial x_k}\overline{u_iu_j}\right)-\rho\left(\overline{u_iu_k}\frac{\partial U_j}{\partial x_k}+\overline{u_ju_k}\frac{\partial U_i}{\partial x_k}\right)-\rho\beta\left(g_i\overline{u_j\theta}+g_j\overline{u_i\theta}\right)\\&+p\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-2\mu\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\frac{\partial u_j}{\partial x_k}}-2\rho\Omega_k\left(\overline{u_ju_m}\varepsilon_{ikm}+\overline{u_iu_m}\varepsilon_{jkm}\right)\end{aligned}\tag{3-17}$$

其中，

$$\begin{cases}D_{ij}^T=\dfrac{\partial}{\partial x_k}\left(\dfrac{\mu_t}{\sigma_k}\dfrac{\partial\overline{u_iu_j}}{\partial x_k}\right)\\\mu_t=\rho C_\mu\dfrac{k^2}{\varepsilon}\\\phi_{ij}=\phi_{ij,1}+\phi_{ij,2}+\phi_{ij}^w\\G_{ij}=\beta\dfrac{\mu_t}{\Pr_t}\left(g_i\dfrac{\partial T}{\partial x_j}+g_j\dfrac{\partial T}{\partial x_i}\right)\\\varepsilon_{ij}=\dfrac{2}{3}\delta_{ij}\left(\rho\varepsilon+Y_M\right)\end{cases}\tag{3-18}$$

式（3-17）中：左边第二项为对流项 C_{ij}；右边第一项为湍流扩散项 D_{ij}^T；右边第二项为分子扩散项 D_{ij}^L；右边第三项为应力产生项 P_{ij}；右边第四项为浮力产生项 G_{ij}；右边第五项为压力应变项 φ_{ij}；右边第六项为耗散项 ε_{ij}；右边第七项为系统旋转产生项 F_{ij}；σ_k 为湍动能对应的普朗特数，σ_k=0.82。

RSM 模型也属于高雷诺数湍流计算模型，在固体壁面附近，由于分子粘性的作用，湍流脉

动受到阻尼，雷诺数很小，上述方程则不再适用。

3.2.4 LES 模型

湍流包含一系列大大小小的涡团，涡的尺度范围相当宽广。为了模拟湍流流动，我们总希望计算网格的尺度小到足以分辨最小涡的运动，然而，就目前的计算机能力来讲，能够采用的计算网格的最小尺度仍比最小涡的尺度大许多。由于系统中的动量、质量、能量及其他物理量的输运主要由大尺度涡影响，因此，假设流动的几何和边界条件决定了大涡的特性，而流动特性主要在大涡中体现，小涡受几何和边界条件的影响较小，并且各向同性，所以计算时直接求解大涡，这种方法就是大涡模型（LES 模型）。

LES 模型的控制方程是对 N-S 方程在波数空间或物理空间进行过滤得到的。过滤的过程是去掉比过滤宽度或给定物理宽度小的涡旋，从而得到大涡旋的控制方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+u\frac{\partial \rho \overline{u_i}}{\partial x_i}=0 \tag{3-19}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\overline{u_i}\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\overline{u_i u_j}\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(u\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j}-\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{3-20}$$

式中：τ_{ij} 为亚网格应力，$\tau_{ij}=\rho\overline{u_i u_j}-\rho\overline{u_i}\,\overline{u_j}$。

3.3 湍流模型设置

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch3\3-3.avi 文件。

选择 FLUENT 12 操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，展开 Models 面板，选中 Viscous-Laminar 选项，单击 Edit 按钮，弹出湍流模型（Viscous Model）对话框，如图 3-37 所示。

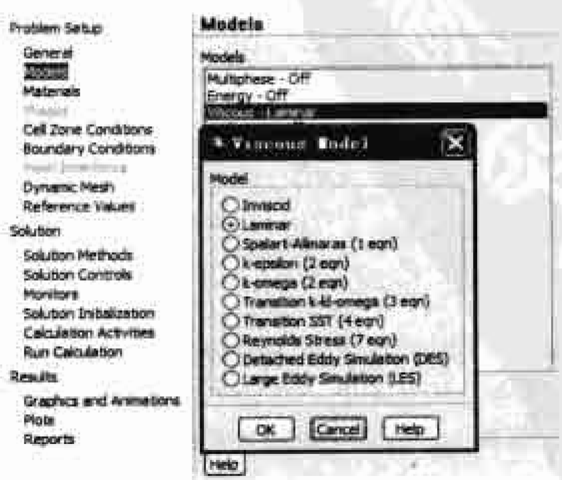


图 3-37　Viscous Model 对话框

用户可根据实际问题的需要选择合适的湍流模型，对话框中从上至下，依次为无粘模型、层流模型、单方程模型、k-ε 模型、k-ω 模型、转变的 k-kl-ω 模型、转变的 SST 模型、雷诺应力模型、直接模拟模型和大涡模拟模型。

当任意选中一个湍流模型，其相应的对话框就会展开，如选中 k-ε 模型，则展开如图 3-38 所示的设置 k-ε 模型的对话框。通常此类对话框包括模型选项的设置和模型参数的定义，由于 k-ε 模型包含 3 种，所以 k-epsilon Model 栏中有 Standard、RNG 和 Realizable 3 个选项。Near-Wall Treatment 是近壁处理方法，通常选择壁面函数（Standard Wall Functions）进行处理。Options 栏中的 Full Buoyancy Effects 复选框是全浮力影响选项。对话框右侧为模型相关参数值的定义，一般情况下保持默认即可。

选择了湍流模型后，在定义边界条件时需要设置其湍流项，如速度入口、压力入口和压力出口等边界。设置速度入口的对话框如图 3-39 所示，其中有 Turbulence 栏，其中的 Specification Method 可选择 K and Epsilon（直接输入 k 和 ε 的值）、Intensity and Length Scale（输入湍动强度和长度）、Intensity and Viscosity Ratio（输入湍动强度和粘度比）、Intensity and Hydraulic Diameter（输入湍动强度和水力直径）4 种方法。用户可根据已知边界的湍流情况选择相应的 Specification Method。

提示： *用户选择 K and Epsilon 选项后，需要根据 k 和 ε 公式计算准确的 k 和 ε 值，若不准确，将导致结果不收敛或误差很大。若不知道 k 和 ε 值时，还可根据几何尺寸选择 Intensity and Hydraulic Diameter 进行设置，相比 K and Epsilon 要稍简单。*

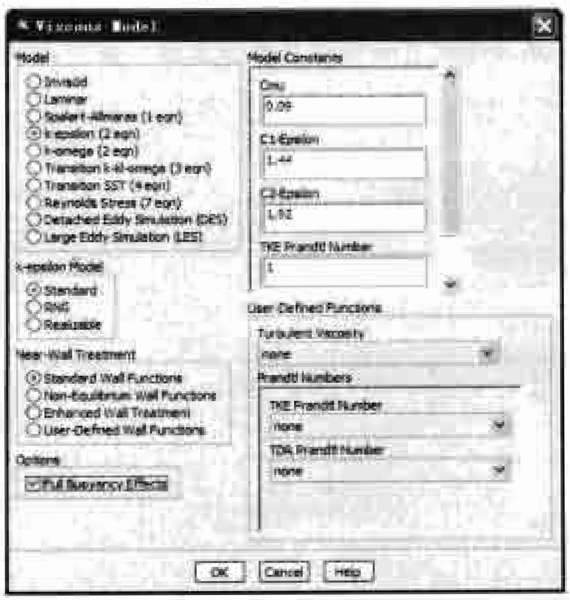


图 3-38　设置 k-ε 模型的对话框

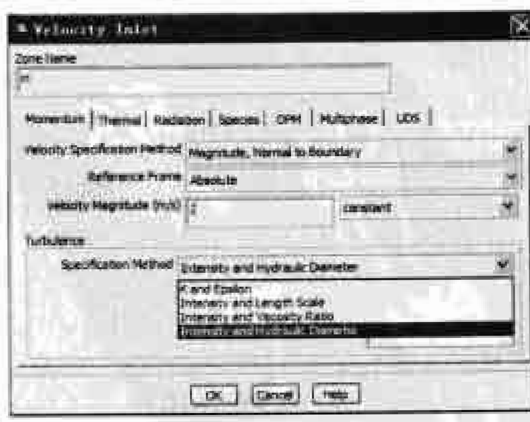


图 3-39　设置速度入口的对话框

3.4　实例·操作——偏心大小头渐扩管内油品流动

在油品管输中经常出现管路变径现象，如图 3-40 所示。在变径段油流因过流截面积的变化

而出现流场变化，其变化程度有多大，造成的能量损失是多少，是实际管输中需要关注的问题。下面以偏心大小头渐扩管内油流为例进行模拟分析，油流进口速度为 1m/s，偏心异径管尺寸如图 3-41 所示。



图 3-40　偏心异径管

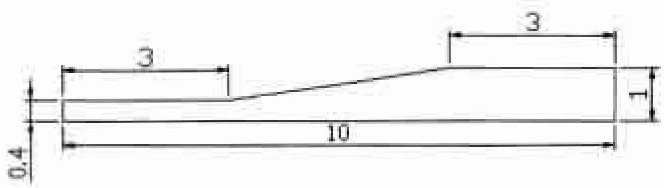


图 3-41　偏心异径管尺寸（单位：m）

【思路分析】

二维模型及网格在 GAMBIT 中建好，导入 FLUENT 后，除简单模型设置外，还需调用标准 *k-ε* 模型，并定义新材料——油品，设置边界条件的湍流项时可选择设置水力直径，整个流程如图 3-42 所示。

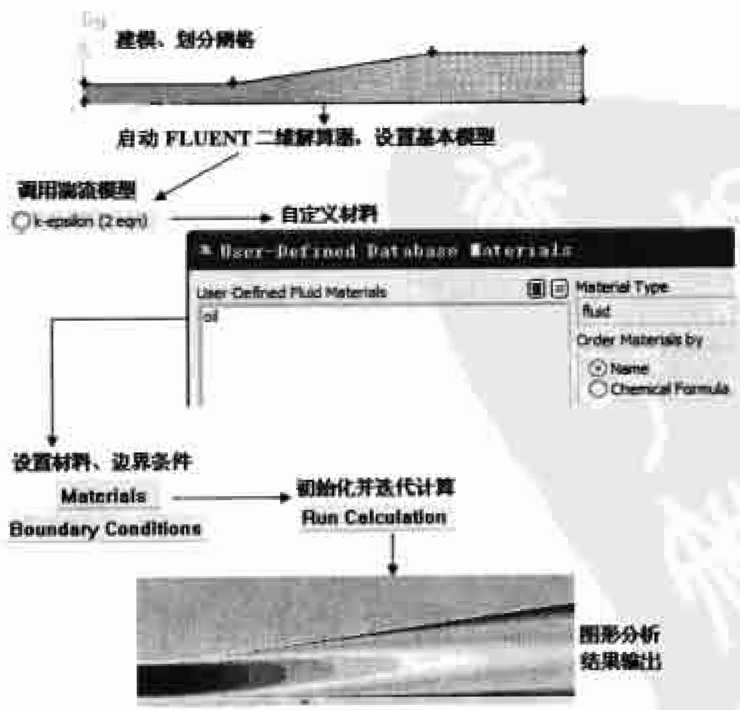


图 3-42　偏心大小头渐扩管内油流模拟的流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch3\3-4.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch3\3-4.cas，3-4.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch3\3-4.avi 文件。

【操作步骤】

（1）双击桌面上的 FLUENT 图标，在弹出的 FLUENT Launcher 界面中选择 Dimension 为 2D，即二维问题，如图 3-43 所示。单击 OK 按钮，打开 FLUENT 12。

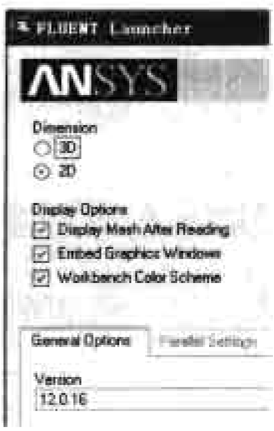


图 3-43　启动 2D 解算器

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中找到 3-4.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中。导入后，FLUENT 的视图窗口会自动出现研究问题的网格，如图 3-44 所示。



图 3-44　导入后自动呈现网格

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，单击 Scale 按钮，即弹出如图 3-45 所示的 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，单击 Close 按钮关闭该对话框。

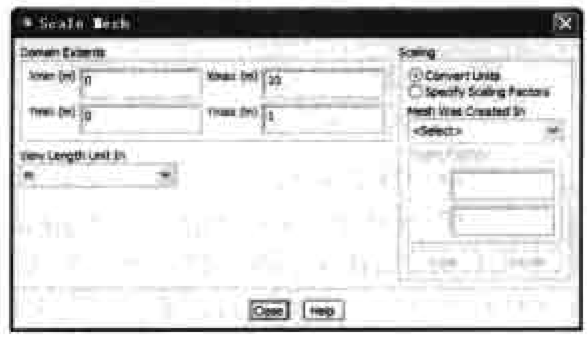


图 3-45　Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，可实现网格的检查，文本界面中同时呈现出网格检查的信息及结果，待最后一句出现 Done，且无 Warn 语句，表示模型网格合适。

（5）General 面板的 Solver 栏中为基本模型设置选项，这里保持默认设置。选中 Gravity 复选框，将展开重力加速度的设置，这里设置 Y 方向有重力加速度，输入“-9.8”。

（6）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，在打开的 Models 面板中双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框。选中 k-epsilon(2 eqn)单选按钮，对话框展开如图 3-46 所示。选中 k-epsilon Model 栏中的 Standard（标准模型）单选按钮，保持 Model Constants 栏中的参数不变，单击 OK

按钮。

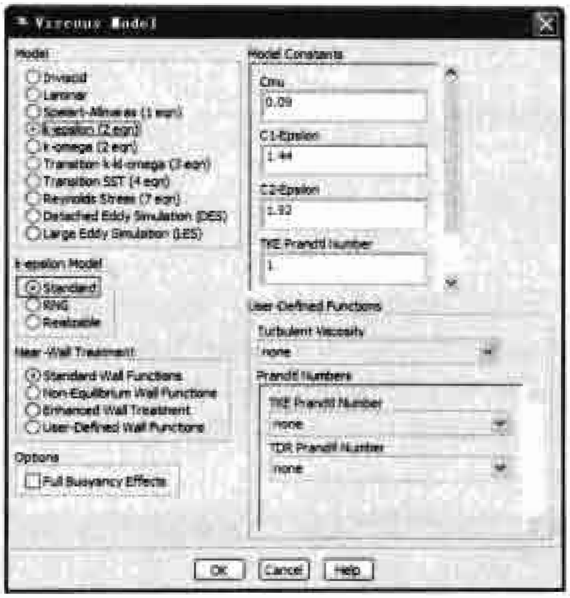


图 3-46　标准 *k-ε* 模型设置

（7）此步骤是本例的关键步骤——定义流动介质材料。选择 Problem Setup 下的 Materials 选项，打开 Materials 面板，FLUENT 默认的流体材料为空气，固体材料为铝，这里需要使用的材料为油，故单击 Materials 面板的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框。单击 User-Defined Database 按钮，弹出如图 3-47 所示的 Open Database 对话框。Database Name 文本输入框中需要输入自定义数据库的名称，若原先不存在自定义数据库，即输入一个新名称，如输入“New Materials”，单击 OK 按钮，弹出如图 3-48 所示的对话框，询问是否要建立此名称定义的数据库，单击 Yes 按钮即可。此时，弹出 User-Defined Database Materials 对话框，左侧列表框中尚没有自定义材料，如图 3-49 所示。保持介质类型为 fluid，单击 New 按钮，弹出如图 3-50 所示的 Material Properties 对话框，在 Name 文本输入框中输入新材料的名字，此处输入“oil”，Formula 为新材料的化学式，若不知道或不确定，可以不输入。设置 Types 为 fluid，并从 Available Properties 列表框中选择 Cp(Specific Heat)、Density、Thermal Conductivity、Viscosity 4 个参数到 Material Properties 列表框中，如图 3-51 所示。然后选择 Cp(Specific Heat)选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 3-52 所示的对话框，选择比热容为常数，并在最下边的数据输入框中输入“1700”，单击 OK 按钮，即定义油的比热容为 1700j/(kg·K)。采用同样的方法定义密度、导热系数和粘度 3 个参数为常数，定义对话框如图 3-53~图 3-55 所示。回到 Material Properties 对话框，依次单击 Apply 按钮和 Close 按钮，即可看到 User-Defined Database Materials 对话框中已经存在新材料 oil，如图 3-56 所示，单击 Copy 按钮，把自定义材料数据库中的 oil 调入到当前工程中，单击 Close 按钮，关闭 Create/Edit Materials 对话框，完成材料定义设置。



图 3-47　Open Database 对话框



图 3-48　询问对话框

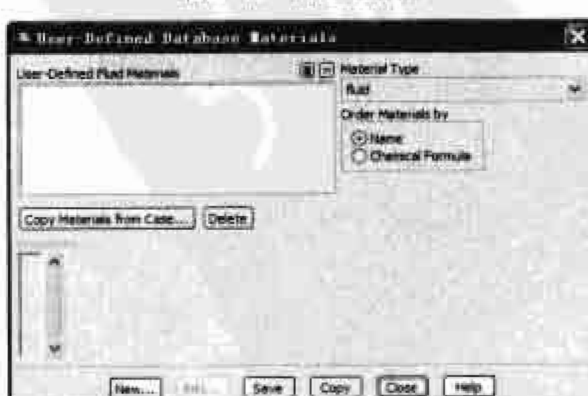


图 3-49　User-Defined Database Materials 对话框

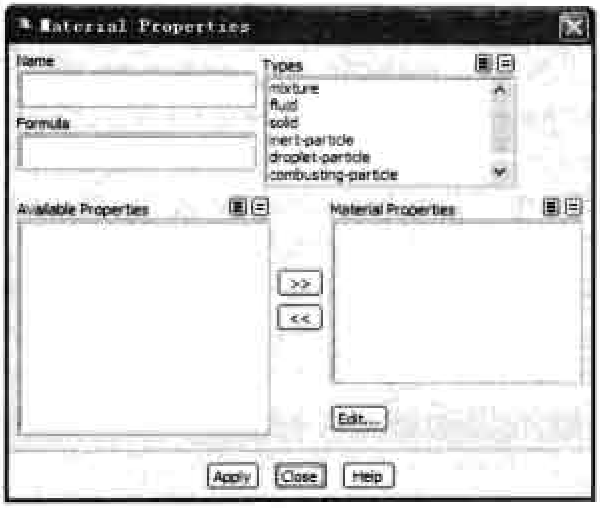


图 3-50 Material Properties 对话框

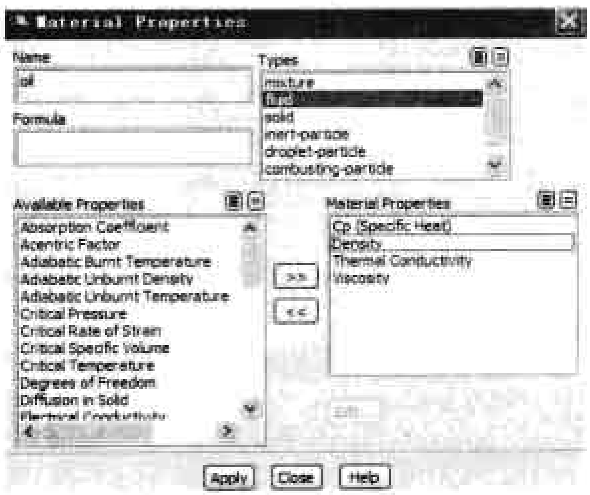


图 3-51 选择要定义的物性参数

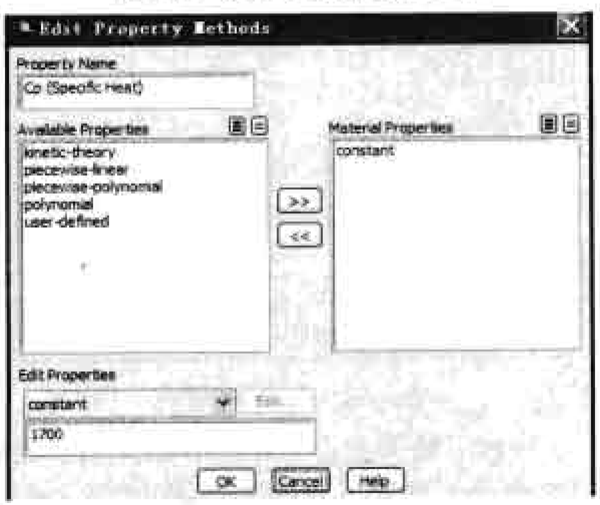


图 3-52 定义比热容



图 3-53 定义密度

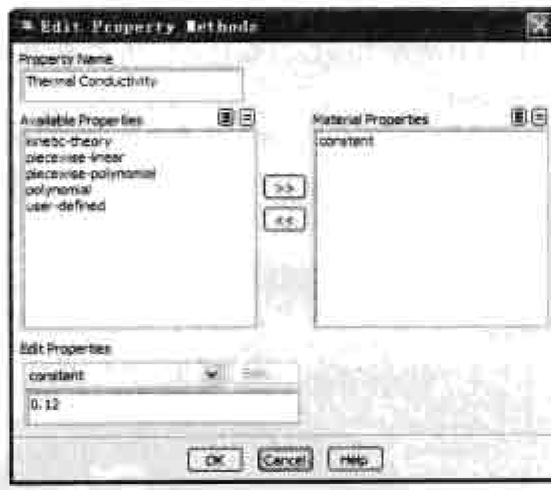


图 3-54 定义导热系数

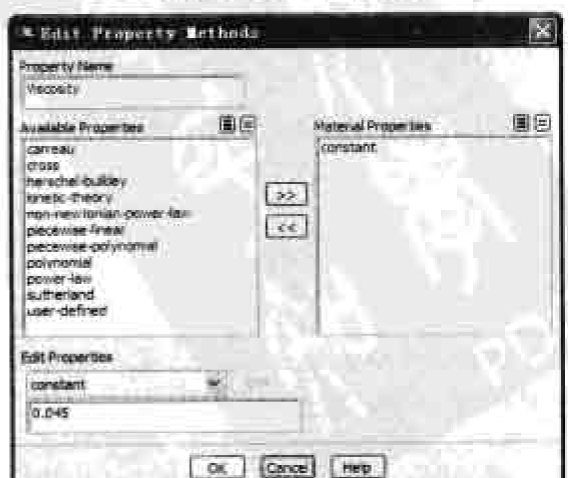


图 3-55 定义粘度

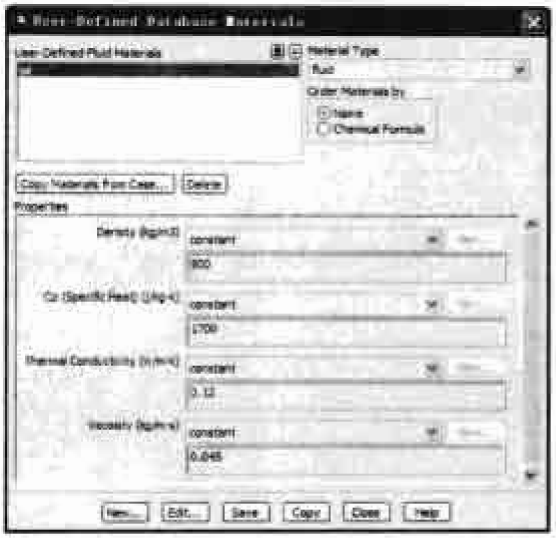


图 3-56 定义好的材料

（8）选择 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，展开 Cell Zone Conditions 面板，单击 Edit 按钮，弹出如图 3-57 所示的 Fluid 对话框，在 Material Name 下拉列表框中选择 oil 选项，单击 OK 按钮。

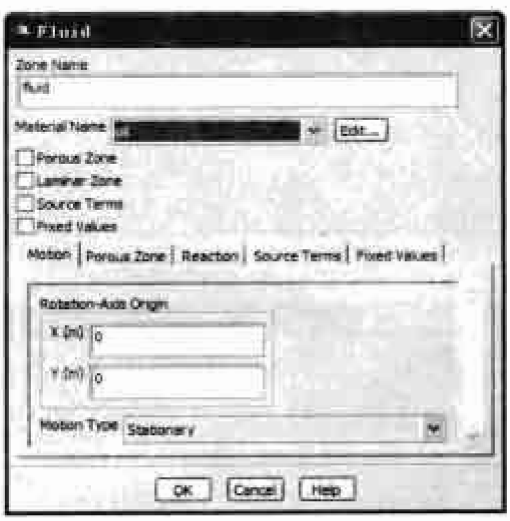


图 3-57 Fluid 对话框

（9）定义边界条件。选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，展开 Boundary Conditions 面板，选中 in 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，设置 Velocity Magnitude(m/s)为 1，设置 Turbulence 方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，其中 Turbulent Intensity(%)为 1，Hydraulic Diameter (m)为 0.4，单击 OK 按钮，如图 3-58 所示。接着选中 Boundary Conditions 面板列表中的 out 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Outflow 对话框，保持 Flow Rate Weighting 为 1，单击 OK 按钮。最后选中 wall 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 3-59 所示的 Wall 对话框，设置 Wall Roughness 的 Roughness Height(m) 为 0.00004，单击 OK 按钮。

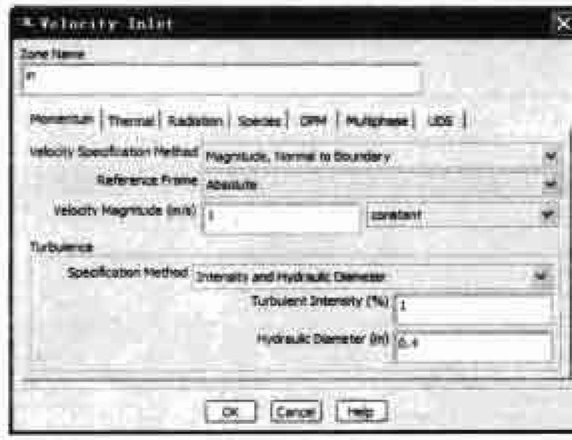


图 3-58 速度入口设置



图 3-59 壁面边界设置

（10）边界定义完后，在操作面板中选择 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开如图 3-60 所示的 Solution Methods 面板，在

其中可进行压力-速度耦合算法设置和压强、动量、能量方程的离散格式设置等，这里保持默认的算法设置。

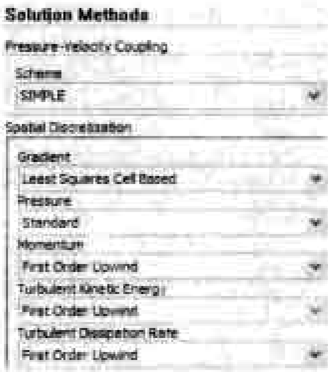


图 3-60 算法设置

（11）在操作面板中选择 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开如图 3-61 所示的 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子。

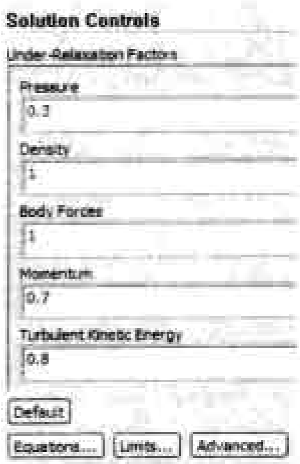


图 3-61 松弛因子设置

（12）在操作面板中选择 Solution 下的 Solution Initialization 选项，选择展开面板中 Compute from 为 in，如图 3-62 所示，单击 Initialize 按钮，完成初始化。

（13）初始化后，在操作面板中选择 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 3-63 所示的面板中设置 Number of Iterations 为 1000，单击 Calculate 按钮即开始计算，计算过程中会弹出计算过程对话框，待对话框中出现 Calculating Completed，则表示计算结束。

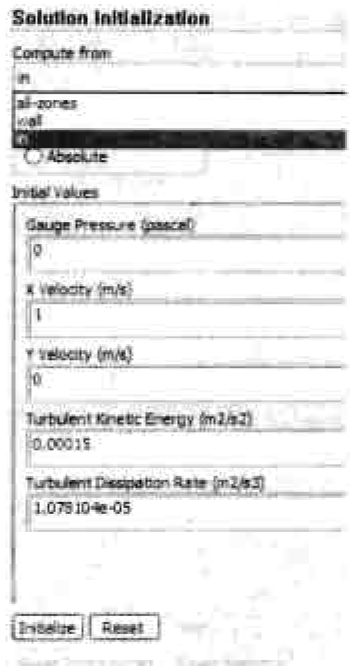


图 3-62 初始化

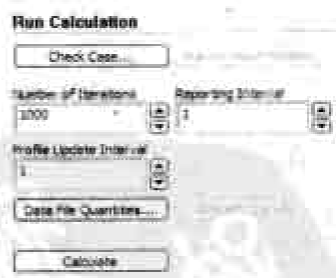


图 3-63 迭代次数设置

（14）计算结束后的残差曲线如图 3-64 所示。

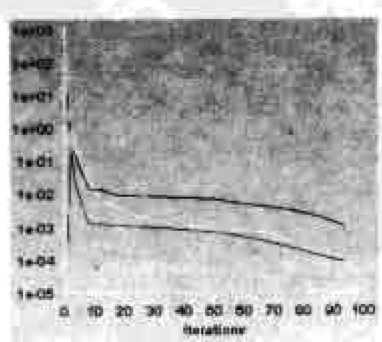


图 3-64 残差曲线

（15）在操作面板中选择 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的 Graphics and Animations 面板中双击 Contours 选项，弹出如图 3-65 所示的 Contours 对话框，保持 Options 栏中的 Filled 复选框不被选中，在 Contours of 栏中选择 Pressure…和 Static Pressure 选项，单击 Display 按钮，可以得到如图 3-66 所示的压强等值线图。若在 Contours of 栏中选择 Velocity…和 Velocity Magnitude 选项，则会出现如图 3-67 所示的速度等值线图。

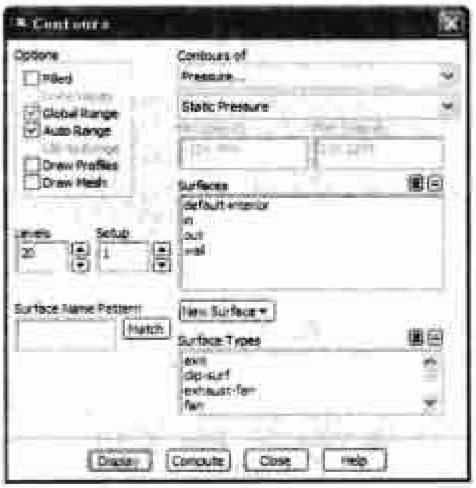


图 3-65　Contours 对话框



图 3-66　压强等值线图

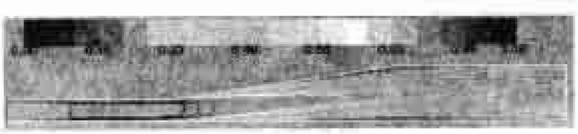


图 3-67　速度等值线图

（16）在操作面板中选择 Results 下的 Plots 选项，展开 Plots 面板，如图 3-68 所示。选择其中的 XY Plot 选项，单击 Set Up 按钮，弹出如图 3-69 所示的 Solution XY Plot 对话框，选中 Options 栏中的 Position on X Axis（表示以 *X* 方向的长度为横坐标）复选框，设置 Y Axis Function 为 Pressure…和 Static Pressure（表示在 *Y* 轴上显示静压强），设置 Surfaces 为 wall（即显示壁面的静压强沿 *X* 方向管长的分布），单击 Plot 按钮，则可在视图窗口中得到该曲线，如图 3-70 所示。

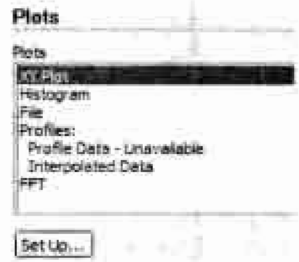


图 3-68　Plots 面板

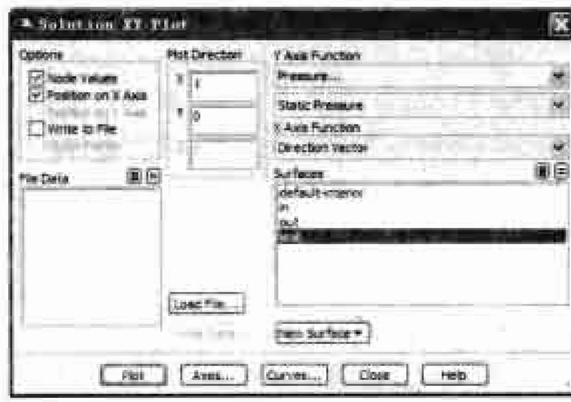


图 3-69　Solution XY Plot 对话框

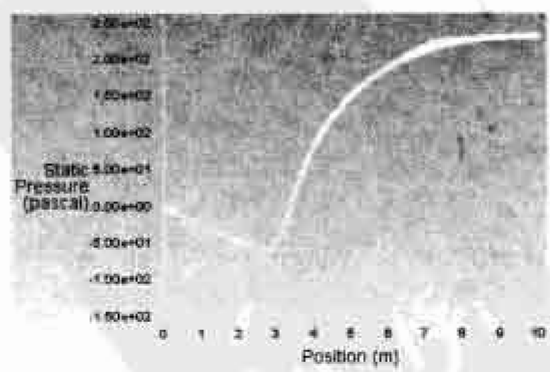


图 3-70　壁面静压沿 *X* 方向管长的分布

（17）图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（3-4.cas 和 3-4.dat）。

（18）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

3.5 实例·练习——气体流经节流嘴的流动

节流嘴（如图 3-71 所示）经常放置在输气管路与气井中，起降压作用，其降压效果如何，是否会导致温度、速度发生变化呢？下面以甲烷流经节流嘴为例进行模拟，节流嘴尺寸如图 3-72 所示。节流嘴进口压强为 20MPa，温度为 60℃，出口压强为 3MPa，温度为 59℃。

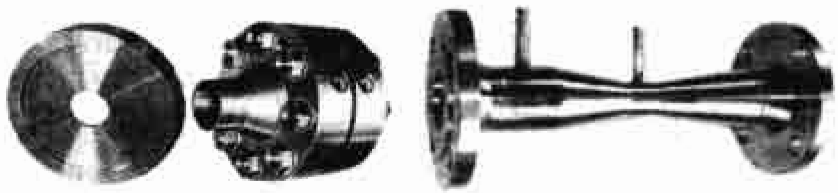


图 3-71 实际节流装置

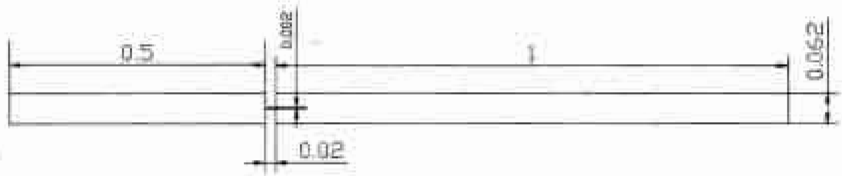


图 3-72 节流嘴尺寸（单位：m）

【思路分析】

首先在 GAMBIT 中建立二维模型及网格，导入 FLUENT 后，调用 RNG k-ε 模型，并定义甲烷气体为可压缩（即设置其密度为理想气体格式），边界条件的湍流项也设置为水力直径，整个流程如图 3-73 所示。

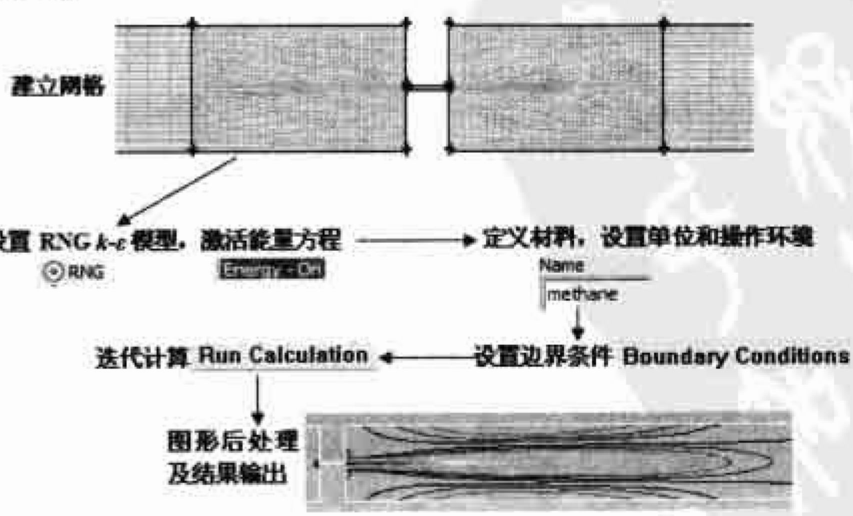


图 3-73 气体流经节流嘴的流动模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch3\3-5.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch3\3-5.cas，3-5.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch3\3-5.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器，如图 3-74 所示。

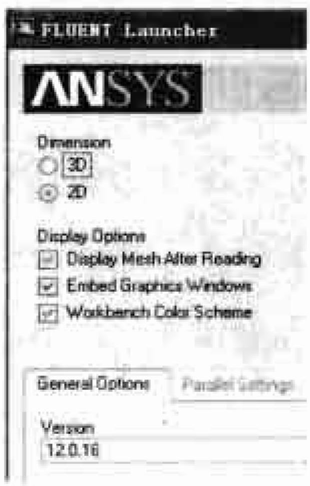


图 3-74　启动 2D 解算器

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中找到 3-5.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中。导入后，FLUENT 的视图窗口自动呈现本例二维网格，如图 3-75 所示。



图 3-75　导入后自动呈现网格

（3）在操作面板中选择 Problem Setup 下的 General 选项，在打开的 General 面板中单击 Scale 按钮，弹出如图 3-76 所示的 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，单击 Close 按钮关闭对话框。

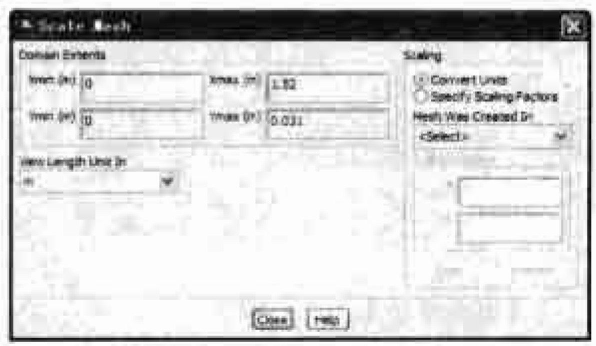


图 3-76　Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，可实现网格的检查，文本界面中同时呈现出网格检查的信息及结果，待最后一句出现 Done，且无 Warn 语句，表示模型网格合适。

（5）Solver 栏中为基本模型设置选项，这里保持默认设置。由于气体的密度较小，故不考虑重力，无须设置重力加速度。

（6）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，在打开的 Models 面板中双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框。选择其中的 k-epsilon(2 eqn)选项，对话框展开如图 3-77 所示。选中 k-epsilon Model 栏中的 RNG（重整化模型）单选按钮，保持 Model Constants 栏中参数不变，单击 OK 按钮。



图 3-77　RNG k-ε 模型设置

（7）由于节流嘴压降伴随着温降，所以需启动能量方程的计算。这里双击 Models 面板中的 Energy-Off，弹出如图 3-78 所示的 Energy 对话框，选中 Energy Equation 复选框。

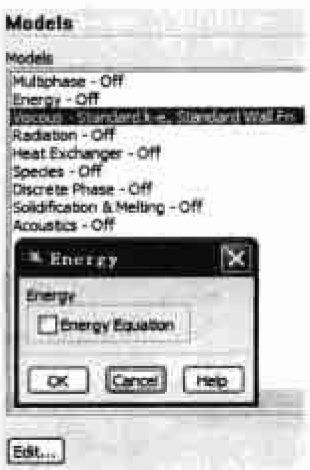


图 3-78　Energy 对话框

（8）选择 Problem Setup 下的 Materials 选项，FLUENT 默认的流体材料为空气，固体材料为铝，这里需要调用甲烷，所以单击 Materials 面板中的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，单击对话框中的 FLUENT Database 按钮，弹出如图 3-79 所示的 FLUENT Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表框中的 methane(ch4)，单击 Copy 按钮，即将 FLUENT 自带材料数据库中的甲烷调用到当前工程中。回到 Create/Edit Materials 对话框，即可看到 FLUENF Fluid Materials 下拉列表框中已经有 methane(ch4)。选择 Properties 栏中 Density (kg/m^3)下拉列表框中的 ideal-gas 选项，使气体为可压缩流体，单击 Change/Create 按钮完成修改，如图 3-80 所示。最后单击 Close 按钮，关闭 Create/Edit Materials 对话框。

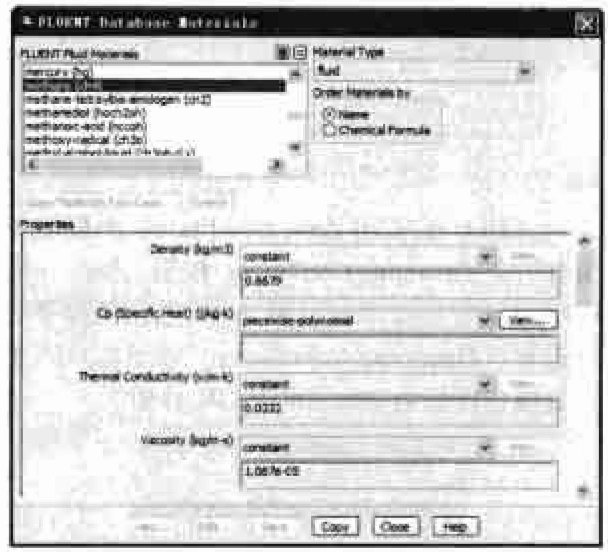


图 3-79　调用甲烷

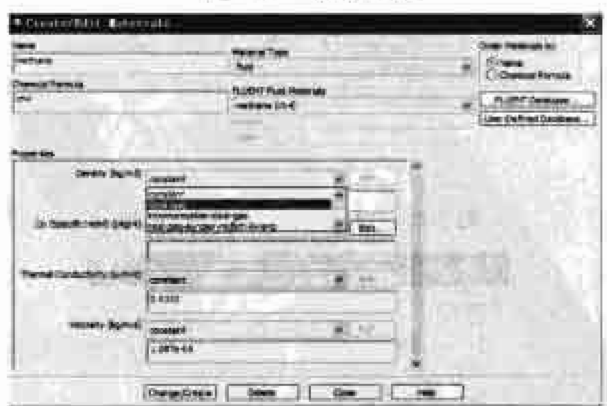


图 3-80　修改甲烷为可压缩气体

（9）选择 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，展开 Cell Zone Conditions 面板，单击 Edit 按钮，弹出如图 3-81 所示的 Fluid 对话框，在 Material Name 下拉列表框中选择 methane 选项，单击 OK 按钮。



图 3-81 Fluid 对话框

（10）在 Cell Zone Conditions 面板右下角有一个 Operating Conditions 按钮，如图 3-82 所示。单击它会弹出如图 3-83 所示的操作环境设置（Operating Conditions）对话框，这里设置操作压强为 0Pa，单击 OK 按钮。

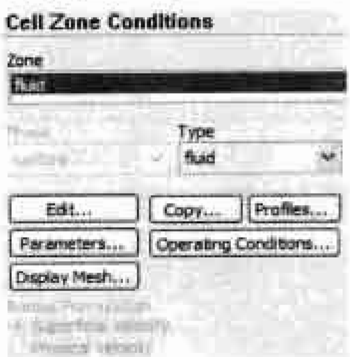


图 3-82 修改甲烷为可压缩气体

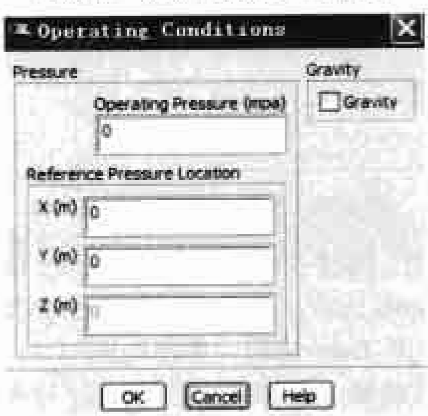


图 3-83 Operating Conditions 对话框

（11）General 面板右下角有一个 Units 按钮，如图 3-84 所示。单击该按钮，会弹出如图 3-85 所示的 Set Units 对话框，在 Quantities 列表框中选择 pressure 选项，Units 列表框中为现有的待选单位，这里设置压强单位为 MPa，因此需要单击 New 按钮，在弹出的如图 3-86 所示的 Define Unit 对话框中自定义，定义完后单击 OK 按钮。回到 Set Units 对话框，在 Quantities 列表框中选择 temperature 选项，在 Units 列表框中选择 c 选项，即完成了温度单位设置，如图 3-87 所示。单击 Close 按钮退出单位设置。



图 3-84 General 面板

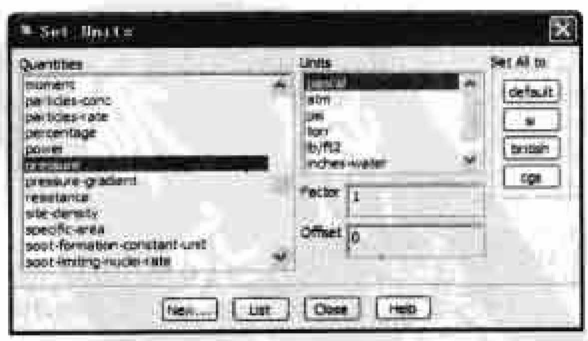


图 3-85 Set Units 对话框

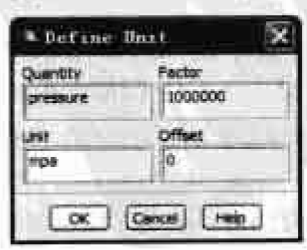


图 3-86 压强单位设置

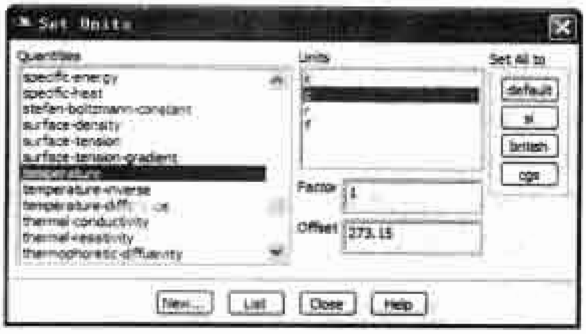


图 3-87　温度单位设置

（12）选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，打开如图 3-88 所示的 Boundary Conditions 面板，选择 in 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Pressure Inlet 对话框，设置 Gauge Total Pressure(mpa)为 20，并设置 Supersonic/Initial Gauge Pressure(mpa)为 19.99，选择 Turbulence 方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，其中 Turbulent Intensity(%)为 1，Hydraulic Diameter(m)为 0.062，如图 3-89 所示。选择 Thermal 选项卡，在 Total Temperature(c)数据输入框中输入进口温度“60”，如图 3-90 所示，单击 OK 按钮，完成入口边界的设置。接着选中 out 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Pressure Outlet 对话框，在 Gauge Pressure(mpa)数据输入框中输入出口压强“3”，同样设置 Turbulence 方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，其中 Backflow Turbulent Intensity(%)为 1，Backflow Hydraulic Diameter(m)为 0.062，如图 3-91 所示。然后选择 Thermal 选项卡，在 Backflow Total Temperature(c)数据输入框中输入出口温度“59”，如图 3-92 所示，单击 OK 按钮。接着选中 duichen 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 3-93 所示的 Symmetry 对话框，单击 OK 按钮。由于本例气流在高压差作用下快速流动，可忽略管壁粗糙度对流动的影响，故不需要定义 Wall 边界。

（13）边界定义完后，选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，保持默认的算法设置。

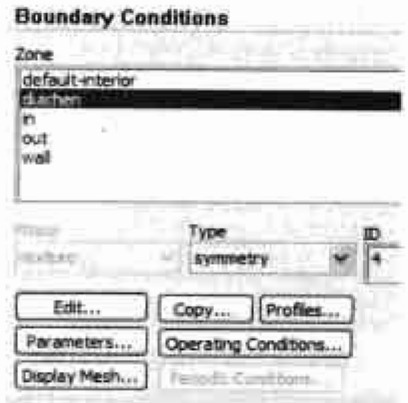


图 3-88　Boundary Conditions 面板

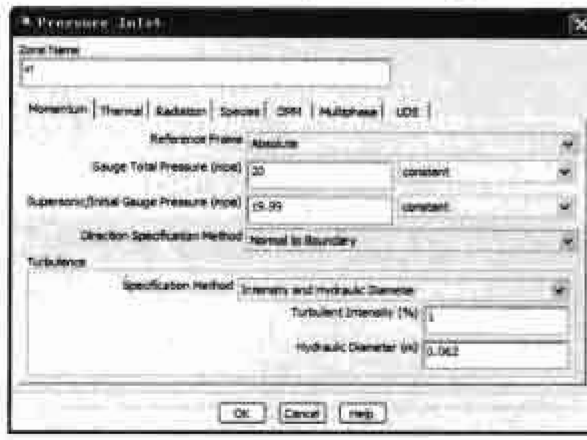


图 3-89　压力入口设置



图 3-90　入口温度设置

（14）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子。

（15）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Initialization 选项，选择展开面板中 Compute from 为 in，如图 3-94 所示，单击 Initialize 按钮，完成初始化。

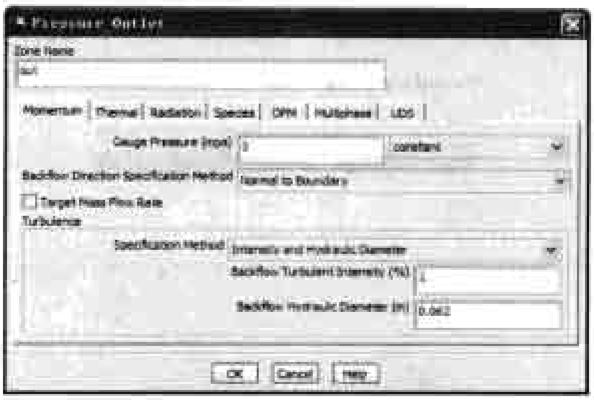


图 3-91　压力出口边界设置



图 3-92　出口温度设置



图 3-93　对称边界设置

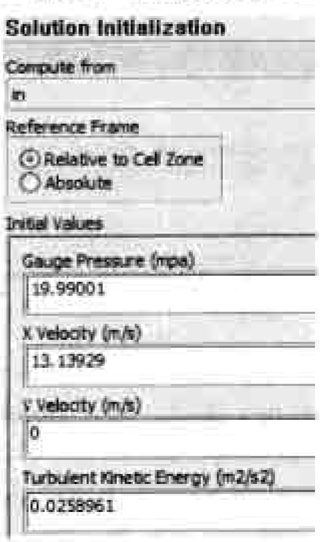


图 3-94　初始化

（16）初始化后，选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，展开 Monitors 面板，如图 3-95 所示。选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 3-96 所示的对话框，其中的 Absolute Criteria 为残差的收敛精度，用户可根据需要自由设置，这里保持默认，单击 OK 按钮。

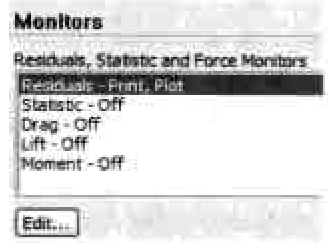


图 3-95　Monitors 面板

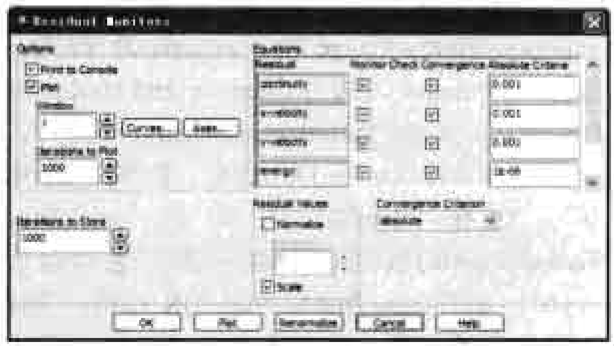


图 3-96　残差精度设置

（17）选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在打开的如图 3-97 所示的面板中设置 Number of Iterations 为 1000，单击 Calculate 按钮即开始计算，待对话框中出现 Calculating Completed，表示计算结束，残差曲线如图 3-98 所示。

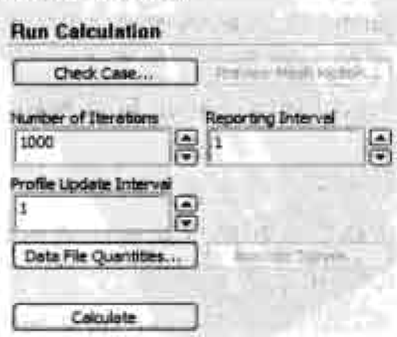


图 3-97　迭代次数设置

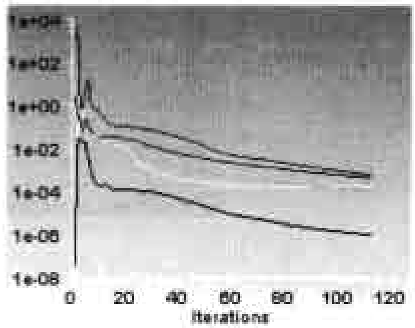


图 3-98　残差曲线

（18）如图 3-99 所示，选择 Display→Views 命令，弹出如图 3-100 所示的 Views 对话框，选中 Mirror Planes 列表框中的 duichen 选项，单击 Apply 按钮，即显示对称结构的另一半。



图 3-99　视图设置操作

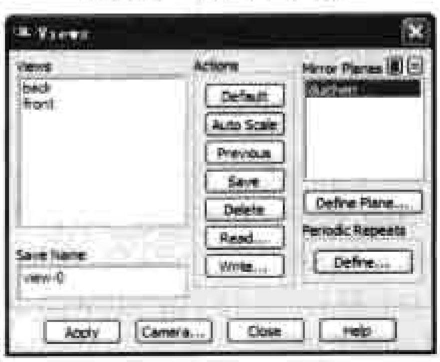


图 3-100　Views 对话框

（19）查看图形结果。选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的 Graphics and Animations 面板中双击 Contours 选项，弹出如图 3-101 所示的 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Velocity...和 Velocity Magnitude 选项，单击 Display 按钮，可以得到如图 3-102 所示的速度云图。若在 Contours of 栏中选择 Temperature...和 Static Temperature 选项，则会出现如图 3-103 所示的温度云图。

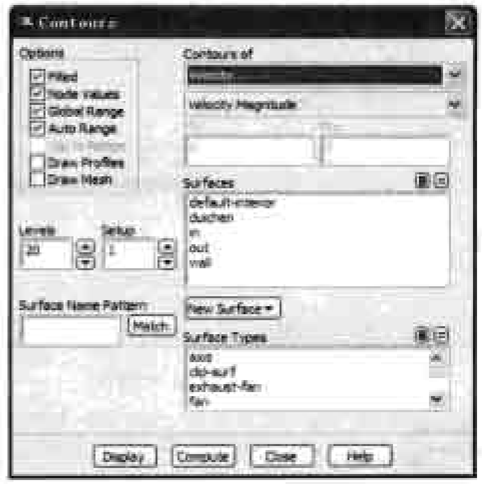


图 3-101　Contours 对话框

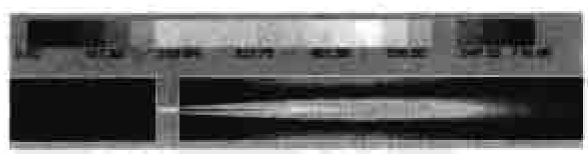


图 3-102　速度云图

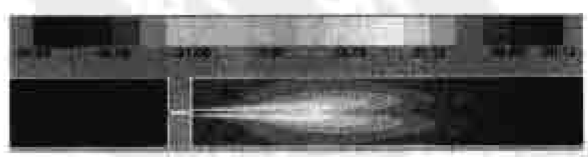


图 3-103　温度云图

（20）选择 Graphics and Animations 操作面板中的 Pathlines 选项，单击 Set Up 按钮，如图 3-104 所示，则弹出 Pathlines 对话框，在 Release from Surfaces 列表框中选择 in 选项，保持 Step Size(m)为 0.01、Steps 为 500，如图 3-105 所示，单击 Display 按钮，得到流动迹线，如图 3-106 所示。

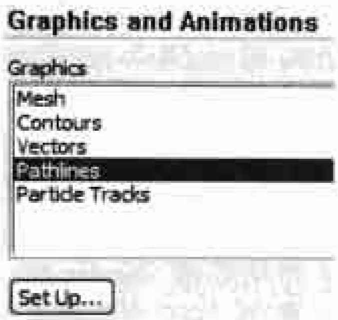


图 3-104　选择显示迹线

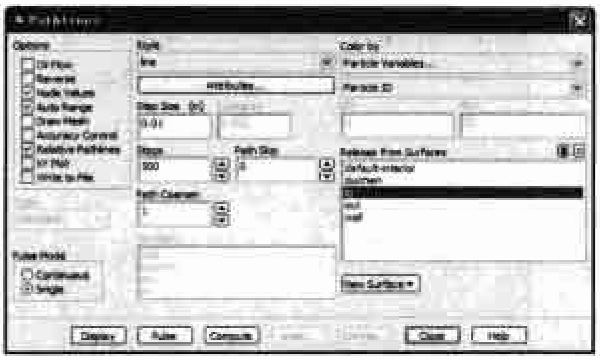


图 3-105　Pathlines 对话框

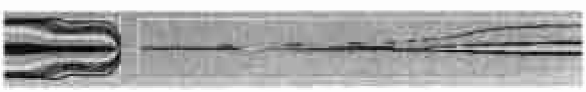


图 3-106　流动迹线

（21）在操作面板中选择 Results 下的 Plots 选项，展开 Plots 面板。选择其中的 XY Plot 选项，单击 Set Up 按钮，弹出如图 3-107 所示的 Solution XY Plot 对话框，选中 Options 栏中的 Position on X Axis 复选框，设置 Y Axis Function 为 Pressure...和 Static Pressure（表示在 *Y* 轴上显示静压强），设置 Surfaces 为 duichen（即显示静压强在对称轴上的分布），单击 Plot 按钮，则可在视图窗口中得到该曲线，如图 3-108 所示。改变 Y Axis Function 为 Velocity...和 Velocity Magnitude，单击 Plot 按钮，可得到速度在对称轴上的分布情况，如图 3-109 所示。

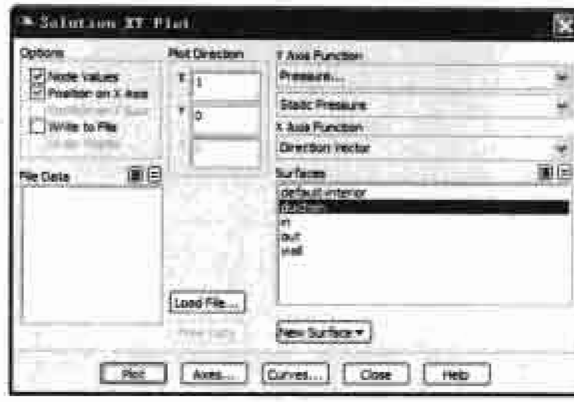


图 3-107　Solution XY Plot 对话框

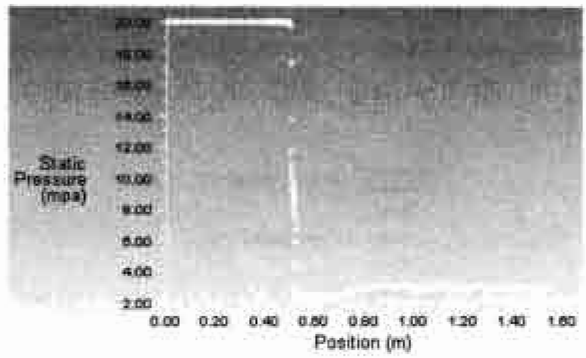


图 3-108　静压在对称轴上的分布

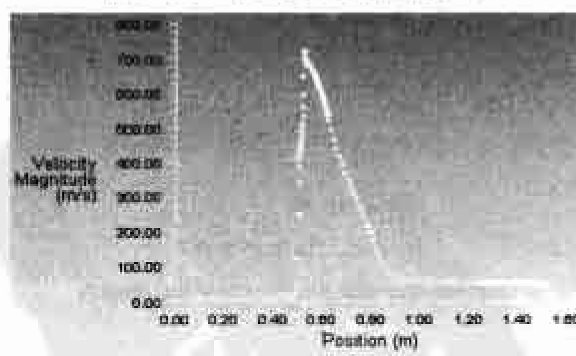


图 3-109　速度在对称轴上的分布

（22）图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（3-5.cas 和 3-5.dat）。

（23）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

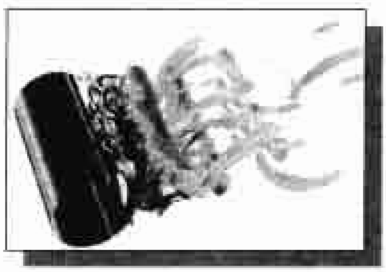
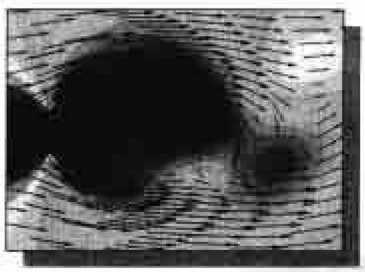
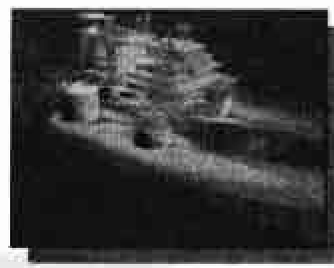
第4讲　非定常模型

实际生活与工程中遇到的绝大多数问题都是非定常问题，即流动要素是随时间发生变化的，相比定常问题，此类问题具有极大的复杂性，一般的理论与实验研究都较困难，故利用计算机数值模拟能够在一定程度上节约成本与时间。

在 FLUENT 中，此类问题需借助非定常模型来解决，本讲即针对非定常模型，介绍其应用条件及设置方法，并通过一系列由浅入深的圆柱绕流问题的仿真模拟来介绍该模型的使用。

本讲内容

- 实例・模仿——单圆柱绕流
- 非定常流动
- 非定常模型设置
- 实例・操作——双圆柱绕流
- 实例・练习——柱群绕流

4.1　实例・模仿——单圆柱绕流

圆柱绕流为最典型的非定常问题，在桥梁工程、轮机工程和海洋工程中经常遇到，如图 4-1 所示。水流绕过桥墩或立管，在柱后会出现漩涡，并在柱前后形成压差，当漩涡的脱落频率与柱体的固有频率同阶时，则会导致柱体振动，这就是所谓的涡激振动，其对柱体安全稳定性的威胁是毋庸置疑的。下面首先演示二维单圆柱绕流的模拟过程，取圆柱体直径为 0.02m，柱前 0.25m 取为计算区域的入口段，柱后计算长度取 0.75m，柱两侧分别取 0.4m 的计算空间，相关尺寸如图 4-2 所示。流动介质为水，密度 998.2kg/m^3，动力粘度 0.001003kg/(m·s)，来流流速为 0.01m/s。

【思路分析】

本例在 GAMBIT 中建立一个矩形面，将其布尔减去一个圆面，即可得到计算区域，关键是网格划分要细致，尤其是柱体周围的网格应更紧密些。网格文件导入 FLUENT 后，设置非定常模型，其余操作与第 3 讲的实例基本相同，只有在最后设置迭代步数时出现不同，非定常模型需要设置时间步长及合适的步数，整个计算流程如图 4-3 所示。

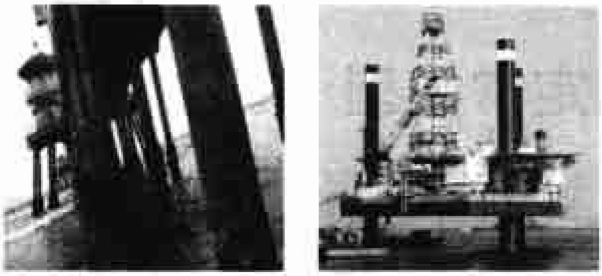


图 4-1 实际工程中的圆柱绕流

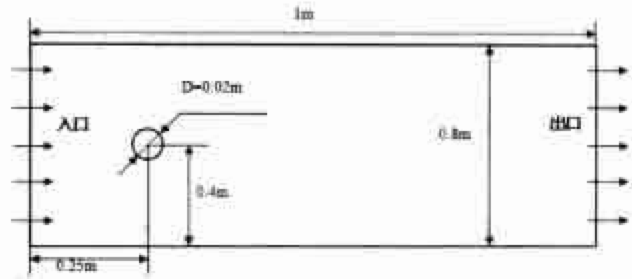


图 4-2 二维单圆柱绕流计算区域的尺寸（单位：m）

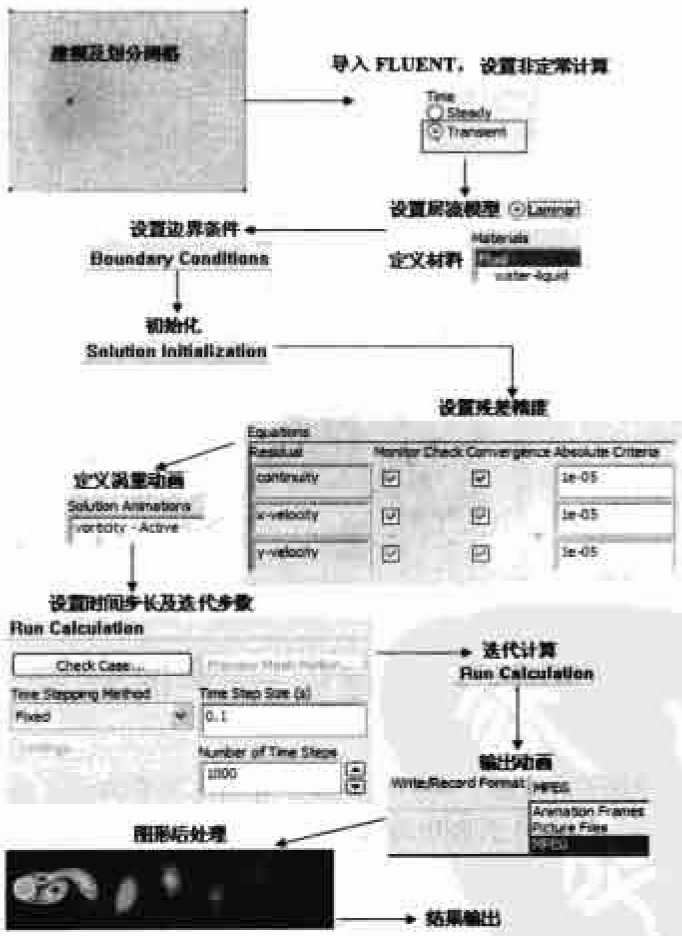


图 4-3 单圆柱绕流模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch4\4-1.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch4\4-1.cas，4-1.dat，4-1.gif，4-1.swf 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch4\4-1.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器，如图 4-4 所示。

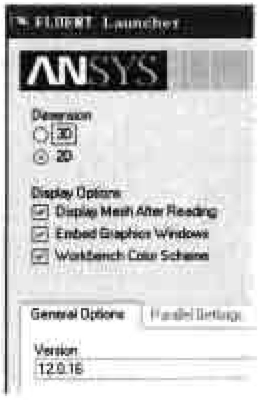


图 4-4　启动 2D 解算器

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中找到 4-1.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，网格如图 4-5 所示。

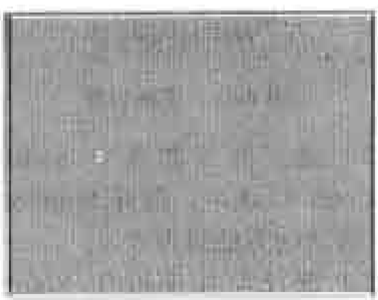


图 4-5　网格

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在打开的 General 面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，如图 4-6 所示，单击 Close 按钮关闭对话框。

（4）单击 General 操作面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done 语句，表示模型网格合适。

（5）Solver 栏中为基本模型设置选项，这里需要选中 Time 下方的 Transient 单选按钮，以启动非定常模型，其余保持默认设置，如图 4-7 所示。

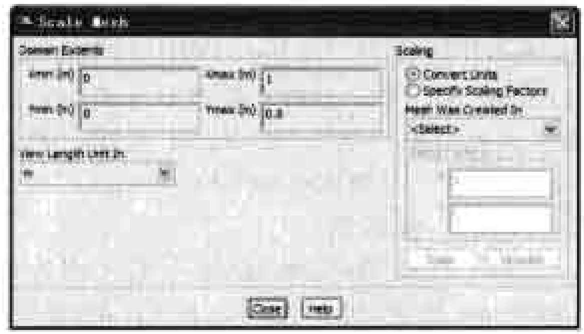


图 4-6　Scale Mesh 对话框

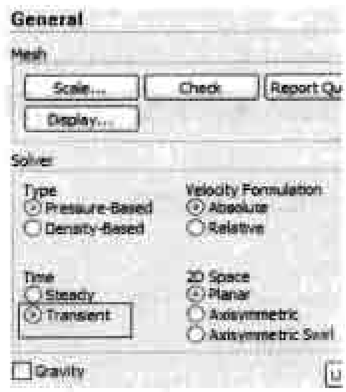


图 4-7　启动非定常模型

（6）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框，如图 4-8 所示。通过计算得知本例雷诺数约为 200，属于层流，故选中 Laminar 单选按钮，单击 OK 按钮即可。

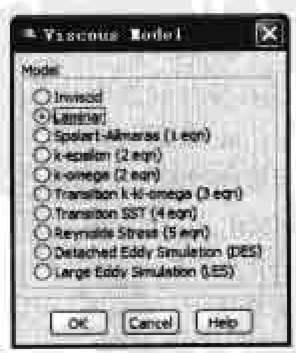


图 4-8　Viscous Model 对话框

（7）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Materials 选项，本例的流动介质为水，所

以单击 Materials 面板的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框。单击 FLUENT Database 按钮，弹出 FLUENT Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表框中的 water-liquid 选项，单击 Copy 按钮。回到 Create/Edit Materials 对话框，单击 Close 按钮。

（8）选择 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，展开 Cell Zone Conditions 面板，单击 Edit 按钮，弹出如图 4-9 所示的 Fluid 对话框，在 Material Name 下拉列表框中选择 water-liquid 选项，单击 OK 按钮。

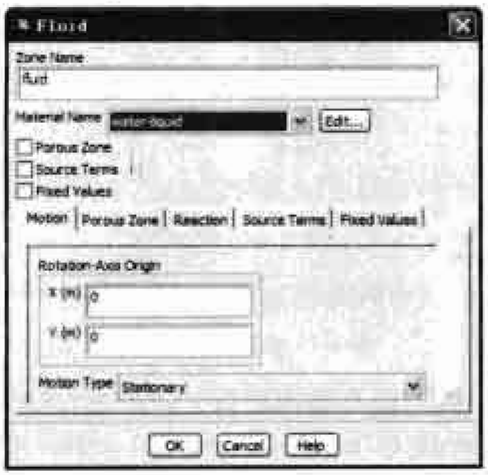


图 4-9　Fluid 对话框

（9）单击 Cell Zone Conditions 面板右下角的 Operating Conditions 按钮，弹出操作环境设置对话框，这里保持默认设置，单击 OK 按钮。

（10）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，在 Boundary Conditions 面板中选择 in 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，设置 Velocity Magnitude(m/s)为 0.01，如图 4-10 所示，单击 OK 按钮。接着选中 Boundary Conditions 面板中的 out 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Outflow 对话框，保持 Flow Rate Weighting 为 1，单击 OK 按钮。

（11）边界定义完后，选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，设置 Pressure 为 Second Order、Momentum 为 Second Order Upwind，如图 4-11 所示。

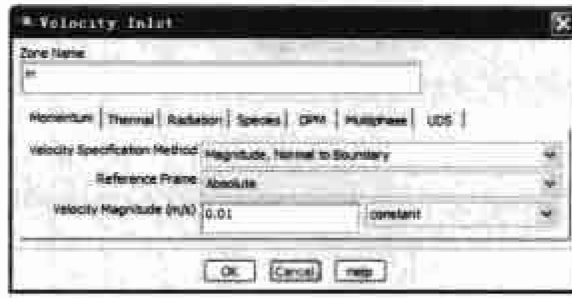


图 4-10　速度入口设置

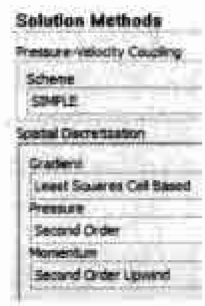


图 4-11　算法设置

（12）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子。

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，展开 Solution Monitors 面板，选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 4-12 所示的对话框，设置各项的收敛精度均为 0.00001，其余保持默认，单击 OK 按钮。

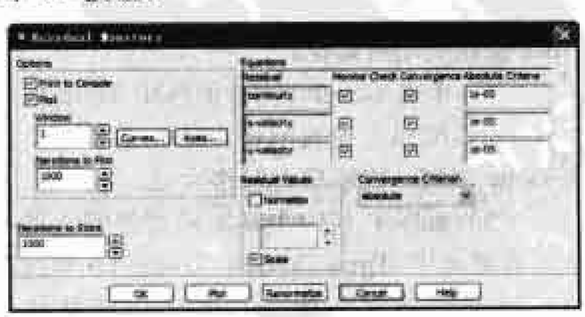


图 4-12　收敛精度设置

（14）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Initialization 选项，选择展开面板中 Compute from 为 in，如图 4-13 所示，单击 Initialize 按钮，完成初始化。

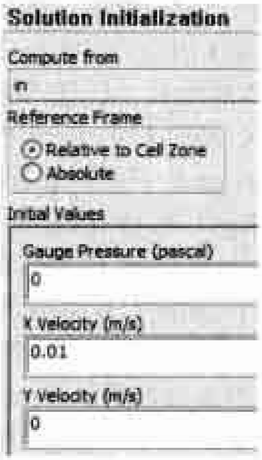


图 4-13　初始化

（15）动画定义。首先选择操作面板中 Solution 下的 Calculation Activities 选项，在展开的 Calculation Activities 面板最下方有一个 Solution Animations 栏，如图 4-14 所示，单击其中的 Create/Edit 按钮，弹出如图 4-15 所示的 Solution Animation 对话框。设置 Animation Sequences 为 1，下方出现一个可用行，其余为灰色显示。在第一行的 Name 列中输入“vorticity”，Every 列中输入“10”，When 列中选择 Time Step，然后单击 Define 按钮，弹出如图 4-16 所示的 Animation Sequence 对话框，设置 Storage Type 为 Metafile，Window 为 1（即用同一个窗口显示动画的帧图片），设置 Display Type 为 Contours，此时弹出如图 4-17 所示的 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled、Node Values、Global Range 复选框，取消选中 Auto Range 复选框，选中 Clip to Range 复选框，在 Contours of 栏中选择 Velocity...和 Vorticity Magnitude 选项，并设置 Min 为 0、Max 为 2，单击 Display 按钮，此时视图窗口中会呈现初始时刻的涡量云图，单击 Close 按钮。连续单击两次 OK 按钮退出动画定义。

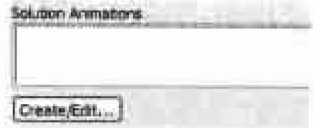


图 4-14　Solution Animations 栏

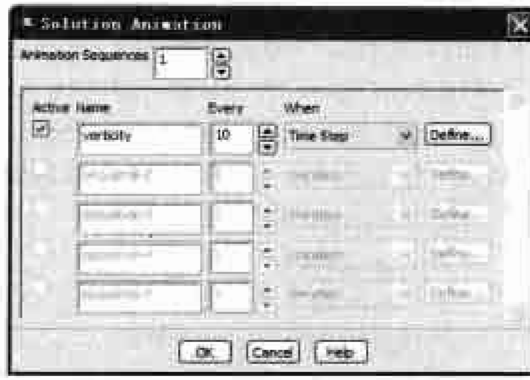


图 4-15　Solution Animation 对话框

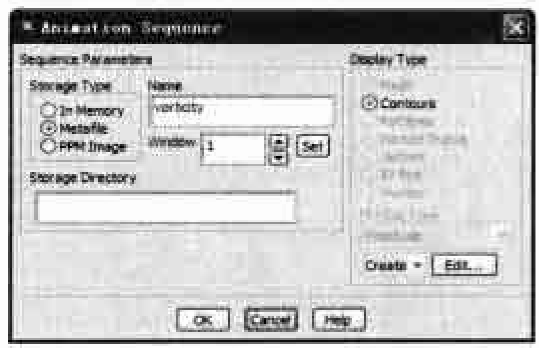


图 4-16　Animation Sequence 对话框

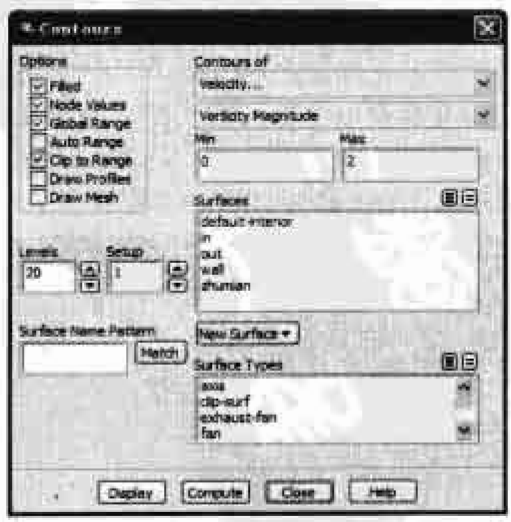


图 4-17　Contours 对话框

（16）动画定义完后，选择操作面板

中 Solution 下的 Run Calculation 选项，展开如图 4-18 所示的面板，与第 3 讲不一样的是，非定常模型需要设置时间步长（Time Step Size(s)），这里输入“0.1”，表示迭代时间步长为 0.1s。然后，选择 Time Stepping Method 为 Fixed，即保持时间步长恒定不变。设置 Number of Time Steps 为 1000，即迭代 1000 个时间步，设置 Max Iterations/Time Step 为 30，即每个时间步最多迭代 30 次，其余保持默认，单击 Calculate 按钮开始计算。

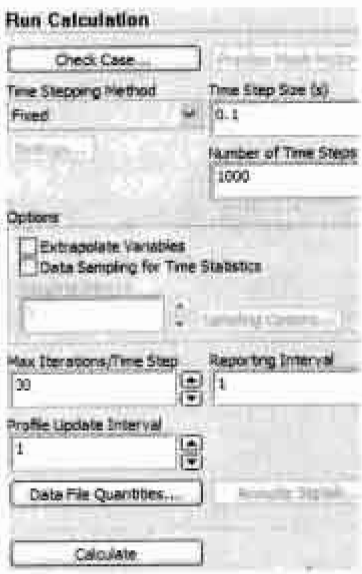


图 4-18 迭代次数设置

（17）计算过程中，每 10 个时间步结束，均会保存一个动画帧文件。待计算进程对话框中出现 Calculating Completed，则表示计算结束，残差曲线如图 4-19 所示。

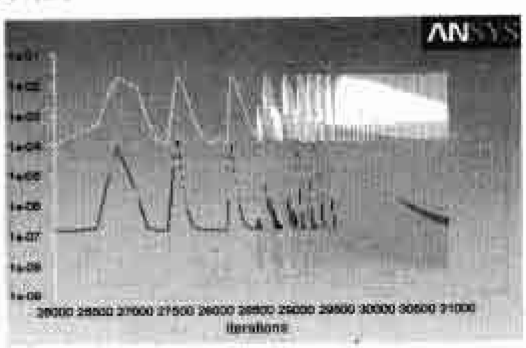


图 4-19 残差曲线

（18）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的 Graphics and Animations 面板中双击 Animations 列表框中的 Solution Animation Playback 选项，如图 4-20 所示。此时，弹出 Playback 对话框，如图 4-21 所示，对话框中部的按钮可用于进行动画的播放、快进等操作，拖拉滚动条可显示不同时刻的动画帧，最下方的 Write/Record Format 下拉列表框用于设置动画文件的导出格式，包括 FLUENT（可识别的帧格式）、Picture Files（每帧动画的图片格式）和 MPEG（动画的视频格式），如图 4-22 所示。这里，首先选择 MPEG 格式，单击 Write 按钮，即可将动画以视频的格式保存在工作目录下。然后选择 Picture Files 格式，并单击 Picture Options 按钮，弹出如图 4-23 所示的 Save Picture 对话框，选择图片格式为 JPEG，设置 Coloring 为 Color，选中 Options 栏中的两个复选框，单击 Apply 按钮。单击 Close 按钮，退出 Save Picture 对话框，回到 Playback 对话框中单击 Write 按钮，将每帧动画都保存为图片，存放在当前工作目录下。用户可以利用 Adobe Image Ready 的动画制作功能，将所有帧的图片串接成 gif 格式的动画文件。



图 4-20 Graphics and Animations 面板

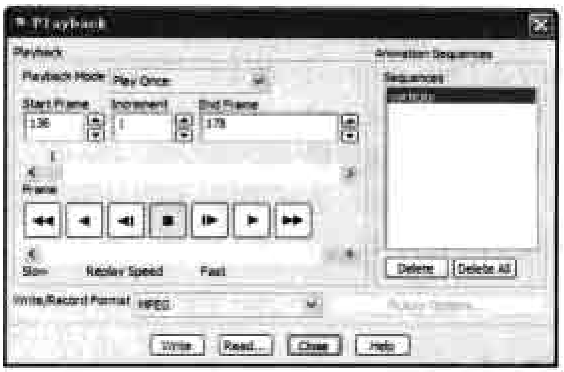


图 4-21　Playback 对话框

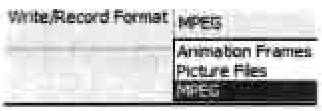


图 4-22　动画输出格式

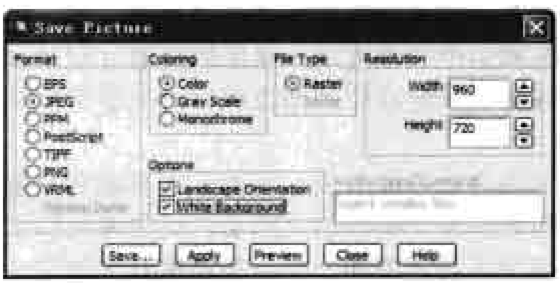


图 4-23　Save Picture 对话框

（19）查看图形结果。双击 Graphics and Animations 面板中的 Contours 选项，弹出 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Velocity…和 Velocity Magnitude 选项，单击 Display 按钮，可以得到如图 4-24 所示的速度云图。若在 Contours of 栏中选择 Velocity…和 Vorticity Magnitude 选项，则会出现如图 4-25 所示的涡量云图。在 Contours of 栏中选择 Pressure…和 Static Pressure 选项，单击 Display 按钮，可以得到如图 4-26 所示的压强云图。

（20）双击 Graphics and Animations 面板中的 Vectors 选项，弹出 Vectors 对话框，保持默认设置，单击 Display 按钮，得到如图 4-27 所示的速度矢量图。按住鼠标中键，出现白色矩形选择框，框选圆柱周围区域，则得到放大的矢量图，如图 4-28 所示。

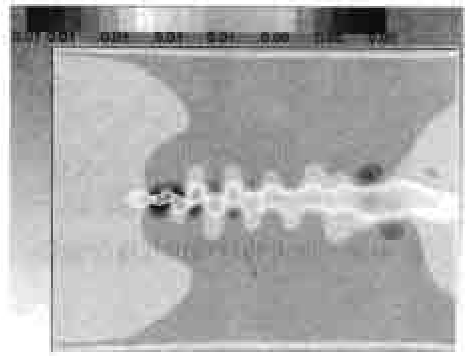


图 4-24　速度云图



图 4-25　涡量云图



图 4-26　压强云图

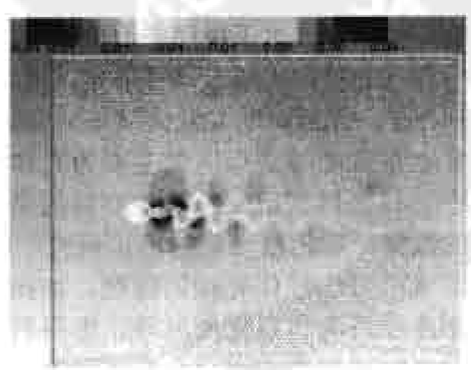
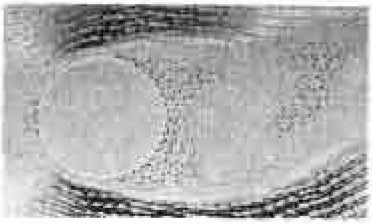


图 4-27　速度矢量图


图 4-28 放大的柱周围速度矢量图

（21）图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（4-1.cas 和 4-1.dat）。这里的.dat 文件仅保存计算结束时刻的数据。

（22）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

4.2 非定常流动

流体的流动状态随时间改变的流动称为非定常流动，若流动状态不随时间而变化，则为定常流动。日常生活中流动的流体几乎都属于非定常流。

按流动随时间变化的速率，非定常流动可分为如下 3 类。

- ◆ 流场变化速率极慢的流动：流场中任意一点的平均速度随时间逐渐增加或减小，在这种情况下可以忽略加速度效应，这种流动又称为准定常流动。水库的排灌过程就属于准定常流动。可认为准定常流动在每一瞬间都服从定常流动的方程，时间效应只是以参量形式表现出来。
- ◆ 流场变化速率很快的流动：在这种情况下需考虑加速度效应。活塞式水泵或真空泵所造成的流动，飞行器和船舶操纵问题中所考虑的流动都属这类流动。这类流动和定常流动有本质上的差别。用伯努利方程描述这类流动需增加一个与加速度有关的项——惯性水头。
- ◆ 流场变化速率极快的流动：在这种情况下流体的弹性力显得十分重要，例如，瞬间关闭水管的阀门时，整个流场中流体不可能立即完全静止下来，速度和压强的变化以压力波（或激波）的形式从阀门向上游传播，产生很大的振动和声响，即所谓水击现象。这种现象不仅发生在水流中，也发生在其他任何流体中。在空气中的核爆炸也会发生类似现象。

除上述的 3 类流动外，某些状态反复出现的流动也被认为是一种非定常流动。典型的例子是流场各点的平均速度和压强随时间做周期性波动的流动，即所谓的脉动流，这种流动存在于汽轮机、活塞泵和压气机的进出口管道中。直升飞机旋叶的转动，飞机和导弹在飞行时的颤振，高大建筑物、桥墩以及水下电缆绕流中的卡门涡街等也都会形成这种非定常流动。流体运动稳定性问题中所涉及的流动也属于这种非定常流动，但是一般并不把湍流的脉动归入这种流动，两者之间的差别在于：湍流脉动参量偏离其平均值要比非定常流动小得多，变化的时间尺度也短得多。

非定常流动的实验研究主要为对自然现象做长期的现场观测，并在实验设备（如水洞、风洞）中进行测量和研究，其主要目的是弄清非定常流动的物理结构，建立正确的概念，并测出真实的数据。非定常流动的理论研究一般是从 N-S 方程出发，根据具体要求进行简化，然后求解。对于可以线性化处理的问题，如掠过无限长平板的粘性流、涡丝在粘性流内的扩散过程及非定常库埃特流和埃克曼流等，曾得到极少量的解析解。N-S 方程的三维非定常差分方法对计算机的容量和速度要求太高，在短时期内还不易实现，目前只有不可压缩流动、二维和线性三维非定常流动问题的研究较有成就。随着 CFD 的发展，数值模拟技术逐渐用于研究非定常流动

问题，涡流、跨声速流动和粘性流等都可通过数值模拟得到较精确的结果。

由于非定常流动范围很广，涉及因素很多，因此现有非定常流动的研究显得分散。然而，随着计算机的迅速发展，模拟仿真与理论研究和实验研究的进一步配合，非定常流动的研究将有较快的发展。

4.3 非定常模型设置

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch4\4-3.avi 文件。

在 General 面板的 Solver 栏中，选中 Time 下方的 Transient 单选按钮，则启动了非定常模型，如图 4-29 所示。

与定常问题不同的是，非定常问题需要设置迭代的时间步长及步数。在 Run Calculation 面板中，Time Stepping Method 为时间步长的格式，其下拉列表中有 Fixed 和 Variable 两个选项，Fixed 表示时间步长在计算的过程中是固定的，Variable 则表示时间步长在计算的过程中根据需要自动调整，即为可变的，如图 4-30 所示。面板中的 Time Step Size(s)为时间步长，用户可根据实际问题设置相应步长，若没有把握，可以在 Time Stepping Method 下拉列表框中选择 Variable 选项，让 FLUENT 在计算的过程中自动调节步长。Number of Time Steps 为时间步，乘以时间步长则为该问题总的流动计算时间。Max Iterations/Time Step 为每一时间步迭代的最大次数，FLUENT 默认为 20，用户可适当调整，建议调大不调小。

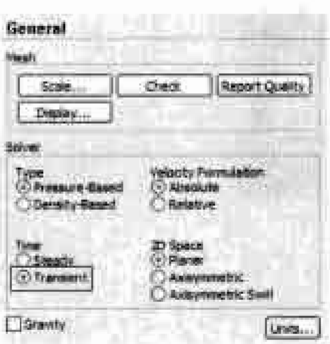


图 4-29　非定常模型的启动



图 4-30　时间步与步长设置

对于非定常问题，用户最关心的是流动要素随时间的变化情况，FLUENT 可以通过动画直观地显示流动参数的变化情况。在 Calculation Activities 面板中单击 Solution Animations 下方的 Create/Edit 按钮，弹出 Solution Animation 对话框，用户可在该对话框中完成动画的设置。如图 4-31 所示，上下箭头可设置动画的个数，Name 为动画的名字，Every 为每迭代多少次或多少个时间步就保存一个动画帧，When 可选择 Iteration（次）或 Time Step（时间步），Define 按钮用于动画显示对象的具体设置。单击 Define 按钮即弹出如图 4-32 所示的 Animation Sequence 对话框，

其中的 Storage Type 为动画帧的储存类型，Window 右侧的上下箭头可调节视图窗口的个数，Display Type 则为动画对象的显示类型，可以是网格、云图、迹线、颗粒轨道和矢量图等。

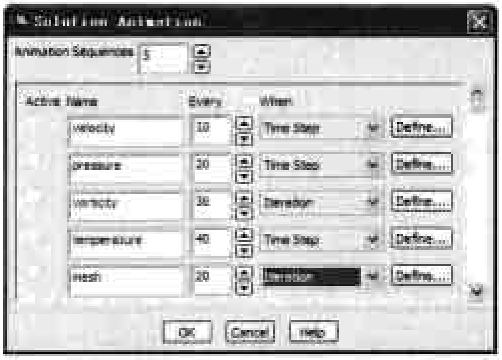


图 4-31　动画设置

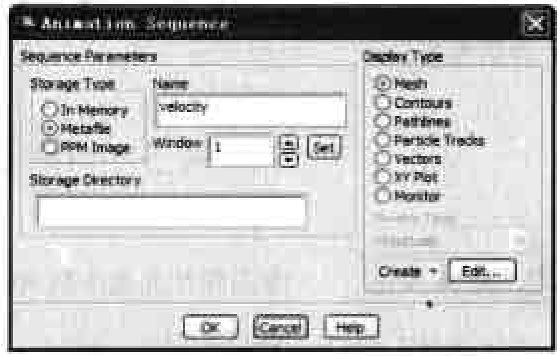


图 4-32　单个动画显示对象的具体设置

4.4　实例·操作——双圆柱绕流

前面讲述了单圆柱绕流的情况，实际生活中的圆柱绕流并不都以单柱形式呈现，往往以双圆柱甚至多圆柱的形式存在，如桥墩绕流，如图 4-33 所示，上游来流依次绕过桥墩的横向双柱，属于串列式双圆柱绕流。因此，本例主要介绍串列式双柱绕流的模拟，来流水流流速仍为 0.01m/s，柱径为 0.02m，两柱心间距为 0.06m，计算区域尺寸如图 4-34 所示。


图 4-33　串列式双圆柱桥墩

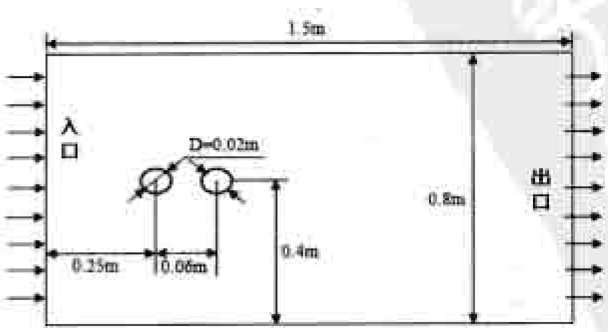


图 4-34　双圆柱绕流计算区域尺寸

【思路分析】

本例比实例·模仿多了一个圆柱，故计算区域在长度上多取了 0.5m。同样，在 GAMBIT 中建立一个矩形面，将其布尔减去两个圆面，即可得到计算区域，网格划分后导入 FLUENT，设置非定常模型，并监测绕流的升力、阻力系数，同时保存涡量动画，整个计算流程如图 4-35 所示。



图 4-35　双圆柱绕流计算流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch4\4-4.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch4\4-4.cas，4-4.dat，4-4.gif 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch4\4-4.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器。

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中找到 4-4.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，网格如图 4-36

所示。

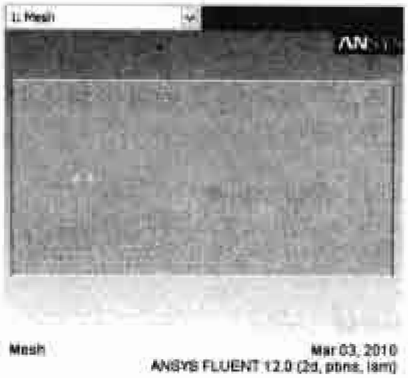


图 4-36　网格

（3）单击 General 面板中的 Scale 按钮，弹出如图 4-37 所示的 Scale Mesh 对话框，检查模型尺寸正确后，单击 Close 按钮关闭对话框。

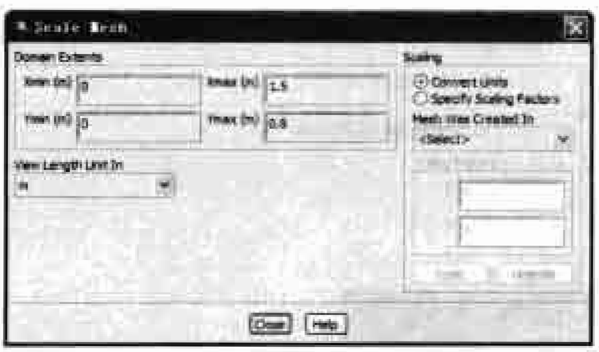


图 4-37　Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 操作面板 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done 语句，表示模型网格合适。

（5）在 General 面板 Solver 栏中，选择 Time 为 Transient，启动非定常模型，其余保持默认设置。

（6）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，打开 Models 面板，双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框，选中 Laminar 单选按钮，单击 OK 按钮。

（7）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Materials 选项，在 Materials 面板中单击 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框。接着单击 FLUENT Database 按钮，弹出 FLUENT Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表框中的 water-liquid，单击 Copy 按钮。回到 Create/Edit Materials 对话框，单击 Close 按钮。

（8）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，展开 Cell Zone Conditions 面板，单击 Edit 按钮，弹出 Fluid 对话框，在 Material Name 下拉列表框中选择 water-liquid 选项，单击 OK 按钮。

（9）单击 Cell Zone Conditions 面板右下角的 Operating Conditions 按钮，弹出操作环境设置对话框，这里保持默认设置，单击 OK 按钮。

（10）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，展开如图 4-38 所示的 Boundary Conditions 面板，选择 Zone 列表框中的 in 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，设置 Velocity Magnitude (m/s)为 0.01，如图 4-39 所示，单击 OK 按钮。接着选中 Boundary Conditions 面板列表框中的 out 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 4-40 所示的 Outflow 对话框，保持 Flow Rate Weighting 为 1，单击 OK 按钮。

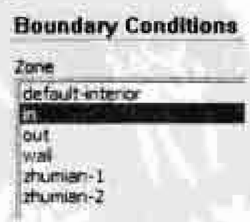


图 4-38　Boundary Conditions 面板

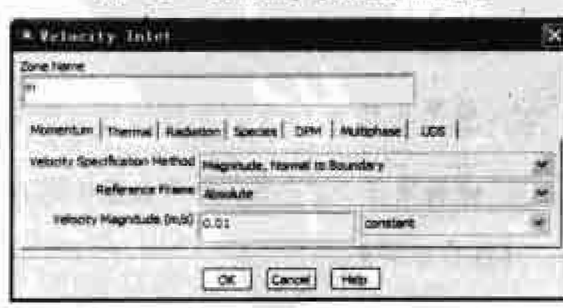


图 4-39　速度入口设置



图 4-40 出口边界设置

（11）边界定义完后，选择操作面板中 Problem Setup 下的 Reference Value 选项，展开如图 4-41 所示的 Reference Values 面板。选择 Compute from 为 in，改变 Reference Values 中 Area(m2)、Depth(m)、Length(m)为 0.02，改变 Velocity(m/s)为 0.01，其余保持默认。

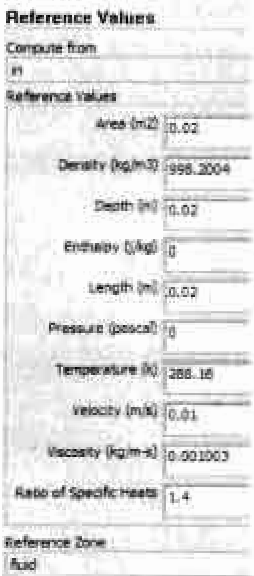


图 4-41 参考值设置

（12）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，选择 Pressure（压强方程）为 Second Order（二阶差分格式），Momentum（动量方程）为 Second Order Upwind（二阶迎风格式）。

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开如图 4-42 所示的 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子。

（14）同样，本例也想得到高精度的计算结果，选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在展开的面板中选择 Residuals-Print, Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 4-43 所示的 Residual Monitors 对话框，设置各项收敛精度均为 0.00001，其余保持默认，单击 OK 按钮。

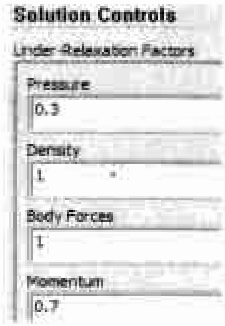


图 4-42 松弛因子设置

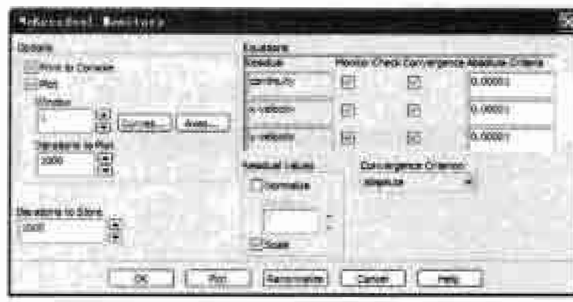


图 4-43 收敛精度设置

（15）设置完收敛精度后，选择操作面板中 Solution 下的 Solution Initialization 选项，选择展开面板中 Compute from 为 in，单击 Initialize 按钮，完成初始化。

（16）定义本例的动画。选择操作面板中 Solution 下的 Calculation Activities 选项，在展开面板的 Solution Animations 栏中单击 Create/Edit 按钮，弹出如图 4-44 所示的 Solution Animation 对话框。设置 Animation Sequences 为 1，设置第一行的 Name 为 vorticity、Every 为 10、When 为 Time Step，然后单击 Define 按钮，弹出如图 4-45 所示的 Animation Sequence 对话框，设置 Storage Type 为 Metafile，Window 为 2（即用另外一个窗口显示动画的帧图片），选择 Display Type 为 Contours，此时自动弹出如图 4-46 所示的 Contours 对话框，

在 Contours of 栏中选择 Velocity…和 Vorticity Magnitude 选项，取消选中 Auto Range 复选框，而选中 Clip to Range 复选框，并设置 Min 为 0、Max 为 2，单击 Display 按钮，此时视图窗口中会呈现初始时刻的涡量云图，单击 Close 按钮。连续单击两次 OK 按钮退出动画定义。



图 4-44　Solution Animation 对话框

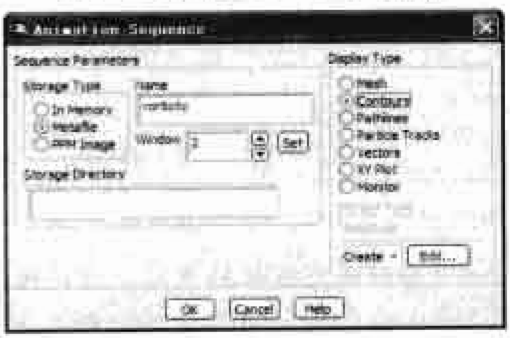


图 4-45　Animation Sequence 对话框



图 4-46　Contours 对话框

（17）动画定义完后，在 Monitors 面板中选择 Drag-Off 选项，如图 4-47 所示，单击 Edit 按钮，弹出如图 4-48 所示的 Drag Monitor 对话框。选中 Options 栏中的 Plot 复选框，设置 Window 为 3，即将阻力系数曲线显示在第三个视图窗口中，选择 Wall Zones 列表框中的 zhumian-1 和 zhumian-2 选项，单击 OK 按钮。同理，选择 Monitors 面板中的 Lift-Off 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 4-49 所示的 Lift Monitor 对话框，选中 Options 栏中的 Plot 复选框，设置 Window 为 4，并选择 Wall Zones 列表框中的 zhumian-1 和 zhumian-2 选项，单击 OK 按钮。

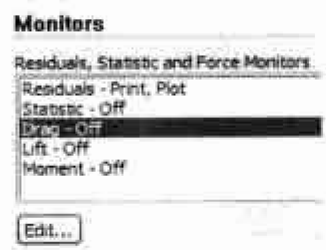


图 4-47　Monitors 面板

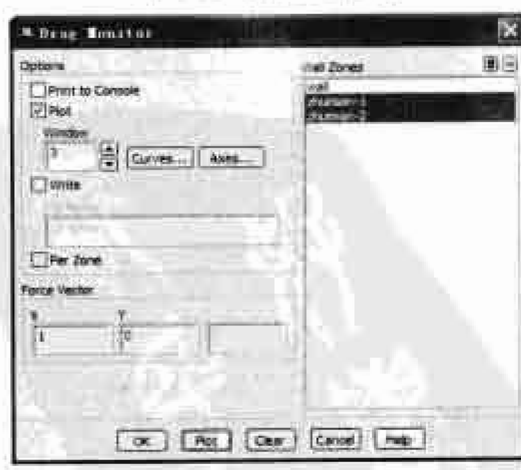


图 4-48　阻力系数设置

（18）上述设置完成后，选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，选择 Time Stepping Method 为 Fixed，设置时间步长为 0.1，迭代步数为 1000，Max Iterations/Time Step 为 30，其余保持默认，如图 4-50 所示，单击 Calculate 按钮即开始计算。

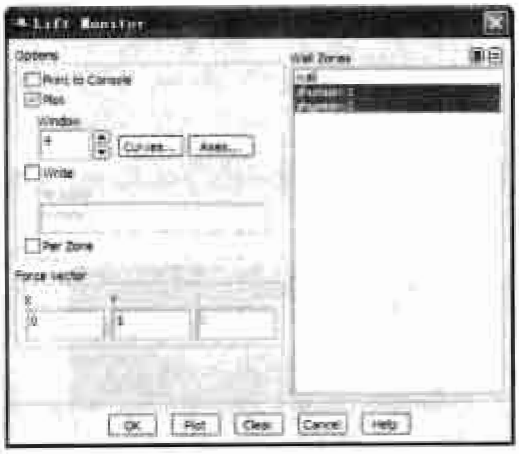


图 4-49　升力系数设置

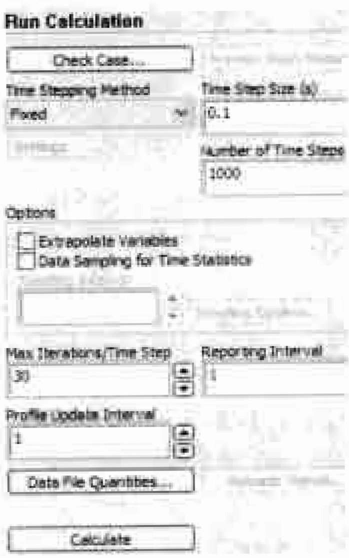


图 4-50　迭代次数设置

（19）计算结束后的残差曲线如图 4-51 所示，一个周期的升力曲线如图 4-52 所示，一个周期的阻力曲线如图 4-53 所示。

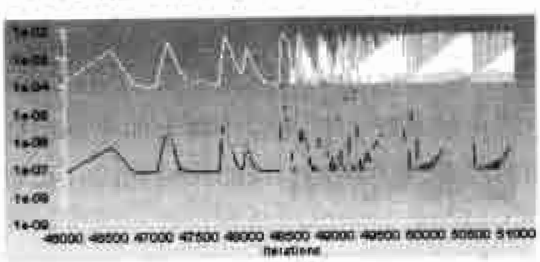


图 4-51　残差曲线

（20）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的 Graphics and Animations 面板中双击 Animations 栏中的 Solution Animation Playback 选项，弹出 Playback 对话框，这里选择 Picture Files 格式，并设置为彩色 JPEG 格式，单击 Write 按钮，将每帧动画以图片形式存放在当前工作目录下。然后利用 Adobe Image Ready 的动画制作功能，将所有帧的图片串接成 gif 格式的动画文件，见结果文件 4-4.gif。

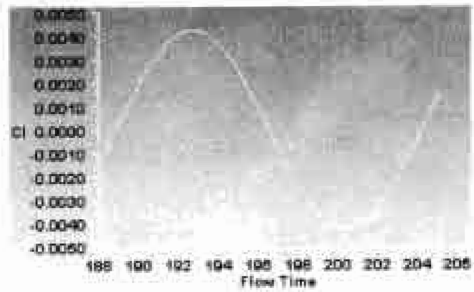


图 4-52　升力曲线

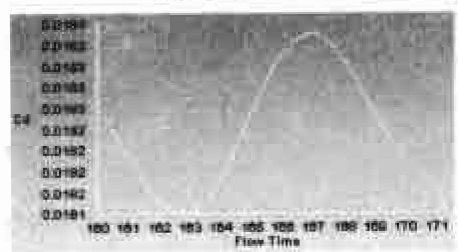


图 4-53　阻力曲线

（21）双击 Graphics and Animations 面板中的 Contours 选项，弹出如图 4-54 所示的 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，并在 Contours of 栏中选择 Velocity... 和 Velocity Magnitude 选项，单击 Display 按钮，得到如图 4-55 所示的速度云图。然后在 Contours of 栏中选择 Velocity...和 Vorticity Magnitude 选项，单击 Display 按钮，得到如图 4-56 所示的涡量云图。若取消选中 Options 栏中的 Filled 复选框，仍在 Contours of 栏中选择 Velocity...和 Velocity Magnitude 选项，单击 Display 按钮，则可得到如图 4-57 所示的速度等值线图。

（22）结束后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件

（4-4.cas 和 4-4.dat）。

（23）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

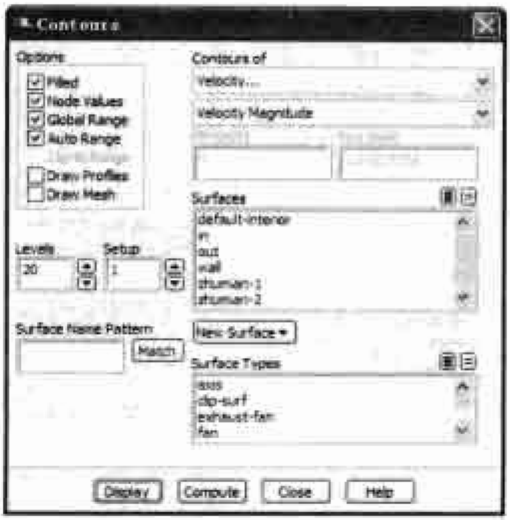


图 4-54　Contours 对话框

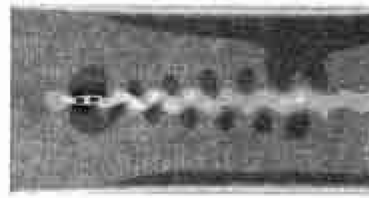


图 4-55　速度云图

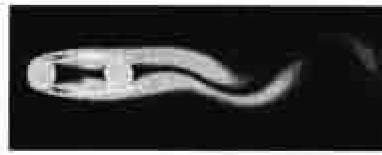


图 4-56　涡量云图

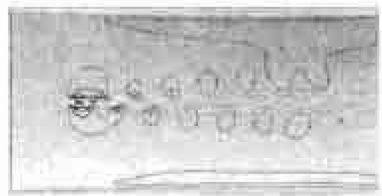


图 4-57　速度等值线图

4.5　实例·练习——柱群绕流

沿海、沿江城市受洪水侵袭的危害性较高，除了构建堤坝外，还需要兴建防洪林，如图 4-58 所示。从某种意义上来说，堤防的防浪林与用材林建设是堤防防汛抢险必要的生物措施，在防洪防浪的同时，营建了岸边生态系统。



图 4-58　圆柱群

当洪水来袭时，水流冲击树木，树木将发生一定程度的晃动，且前后排树木的晃动幅度不一。防洪林树木的晃动虽由水流冲击导致，但晃动的树木改变了原先水流的流通轨道，反过来又影响后续水流的流动。因此，树林与水流之间是一个反复影响的流固耦合过程，要得到动态的流场分布难度很大。

本例将针对此类多柱绕流问题进行模拟分析，由于柱群绕流比双柱绕流更加复杂，且大规模柱群绕流模拟将消耗大量的计算机资源，故本例模拟 3×3 的柱群绕流，来流流速仍为 0.01m/s，柱体直径为 0.02m，柱群排列有序，上下左右间距均为 0.06m，计算区域尺寸如图 4-59 所示。

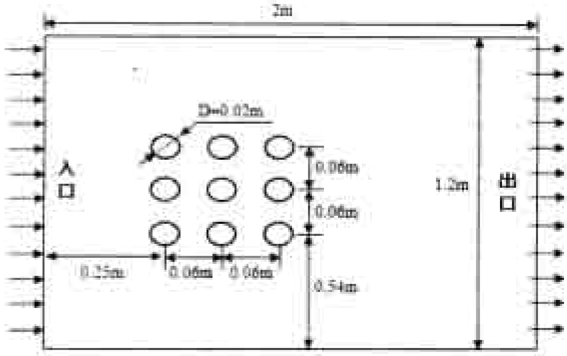


图 4-59　柱群绕流计算区域尺寸

【思路分析】

柱群绕流中柱与柱之间的漩涡存在相互影响，故计算区域长宽均较双柱时取得大，且柱间的网格需要细化，在 GAMBIT 中划分完网格后导入 FLUENT，设置非定常模型，监测涡量动画，整个计算流程如图 4-60 所示。



图 4-60　柱群绕流计算流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch4\4-5.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch4\4-5.cas，4-5.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch4\4-5.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器。

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，导入网格文件，网格如图 4-61 所示。



图 4-61　网格

（3）单击 General 面板中的 Scale 按钮，在弹出的 Scale Mesh 对话框中检查模型尺寸，如图 4-62 所示，单击 Close 按钮关闭对话框。

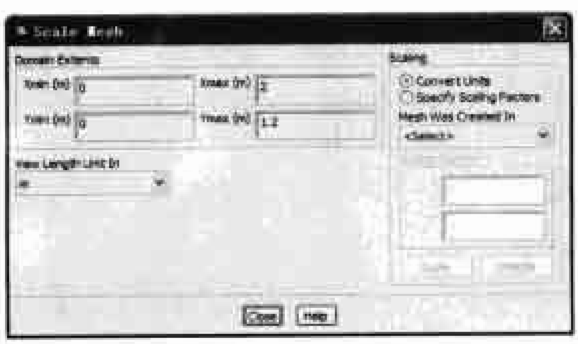


图 4-62　Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 操作面板 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done 语句，表示模型网格合适。

（5）在 General 面板的 Solver 栏中，选择 Time 为 Transient，启动非定常模型，其余保持默认设置，如图 4-63 所示。

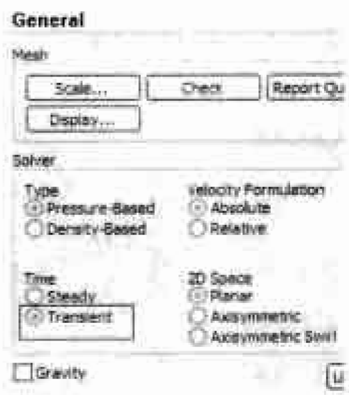


图 4-63　启动非定常模型

（6）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框，选中 Laminar 单选按钮，如图 4-64 所示，单击 OK 按钮。

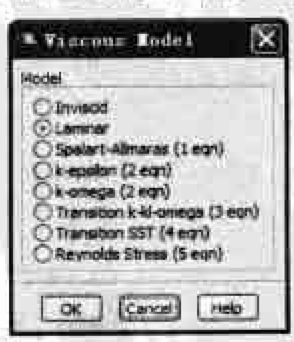


图 4-64　启动层流模型

（7）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Materials 选项，在 Materials 面板中单击

Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框。然后单击 FLUENT Database 按钮，弹出 FLUENT Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表框中的 water- liquid 选项，单击 Copy 按钮。回到 Create/Edit Materials 对话框，即可看到此时下拉列表框中已经存在 water-liquid，如图 4-65 所示，单击 Close 按钮。

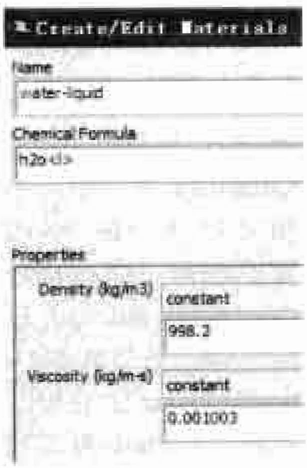


图 4-65 调用数据库材料——水

（8）设置计算区域的流动介质为刚调入的材料——水。选择操作面板中 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，展开 Cell Zone Conditions 面板，单击 Edit 按钮，弹出 Fluid 对话框，在 Material Name 下拉列表框中选择 water-liquid 选项，单击 OK 按钮。

（9）本例的操作环境为 FLUENT 的默认值即可，故单击 Cell Zone Conditions 面板右下角的 Operating Conditions 按钮，直接单击 OK 按钮。

（10）定义问题的边界条件。选择操作面板中 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，展开 Boundary Conditions 面板，选择 Zone 列表框中的 in，单击 Edit 按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，设置 Velocity Magnitude (m/s)为 0.01，如图 4-66 所示，单击 OK 按钮。然后选中 Boundary Conditions 面板列表框中的 out 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 4-67 所示的 Outflow 对话框，保持 Flow Rate Weighting 为 1，单击 OK 按钮。

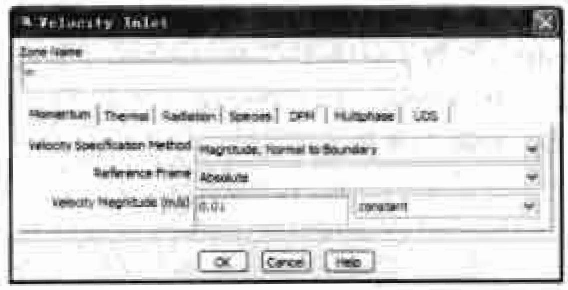


图 4-66 速度入口设置



图 4-67 出口边界设置

（11）设置计算参考值。单击操作面板中 Problem Setup 下的 Reference Value 选项，展开 Reference Values 面板，选择 Compute from 为 in，改变 Reference Values 中 Area(m2)、Depth(m)、Length(m)为 0.02，其余保持默认，如图 4-68 所示。

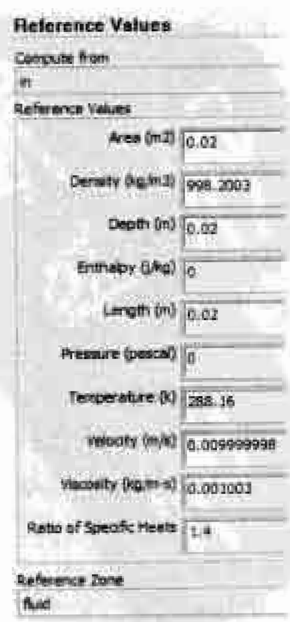


图 4-68 参考值设置

（12）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，选择 Pressure（压强方程）为 Second Order（二阶差分格式），Momentum（动量方程）为 Second Order Upwind（二阶迎风格式），如图 4-69 所示。

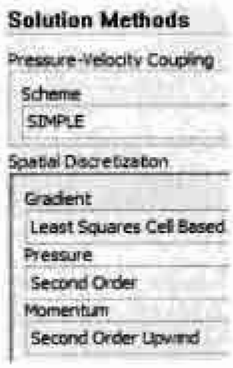


图 4-69 设置离散格式

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开如图 4-70 所示的 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子。

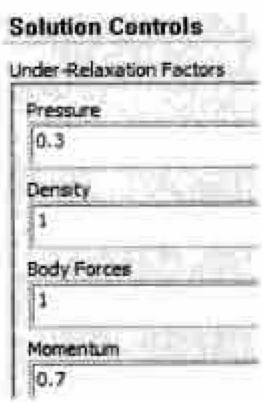


图 4-70 松弛因子

（14）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在展开的面板中选择第一项，单击 Edit 按钮，在弹出的 Residual Monitors 对话框中设置各项收敛精度均为 0.00001，如图 4-71 所示，单击 OK 按钮。

（15）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Initialization 选项，选择展开面板中 Compute from 为 in，单击 Initialize 按钮，进行流场的初始化。

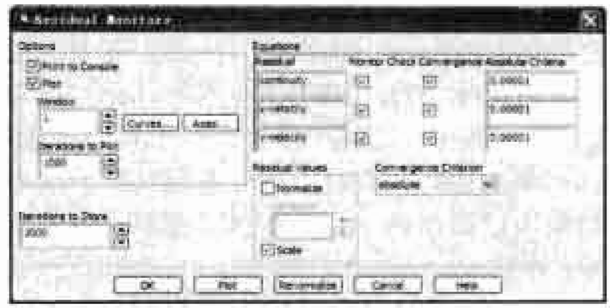


图 4-71 收敛精度设置

（16）选择操作面板中 Solution 下的 Calculation Activities 选项，在展开面板最下方的 Solution Animations 栏中单击 Create/Edit 按钮，弹出如图 4-72 所示的 Solution Animation 对话框。设置 Animation Sequences 为 1，设置第一行的 Name 为 vorticity、Every 为 10，When 为 Time Step，然后单击 Define 按钮，弹出 Animation Sequence 对话框，设置 Storage Type 为 Metafile，Window 为 2，选择 Display Type 为 Contours，此时自动弹出如图 4-73 所示的 Contours 对话框，在 Contours of 栏中选择 Velocity...和 Vorticity Magnitude 选项，取消选中 Auto Range 复选框，而选中 Filled 和 Clip to Range 复选框，并设置 Min 和 Max 分别为 0 和 2，单击 Display 按钮，此时视图窗口中会呈现初始时刻的涡量云图，单击 Close 按钮。连续单击两次 OK 按钮退出 Animation Sequence 和 Solution Animation 对话框。

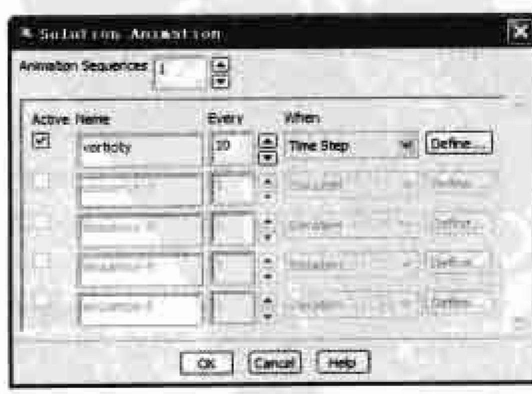


图 4-72 Solution Animation 对话框

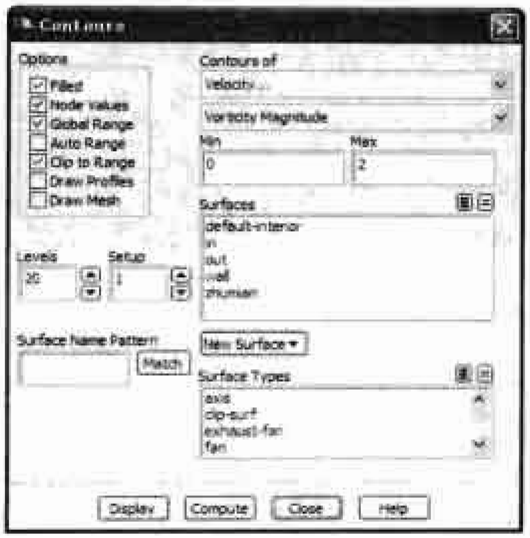


图 4-73　Contours 对话框

（17）上述设置完成后，选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，选择 Time Stepping Method 为 Fixed，设置时间步长为 0.1，迭代步数为 2000，Max Iterations/Time Step 为 30，其余保持默认，单击 Calculate 按钮即开始计算，计算结束后的残差曲线如图 4-74 所示。

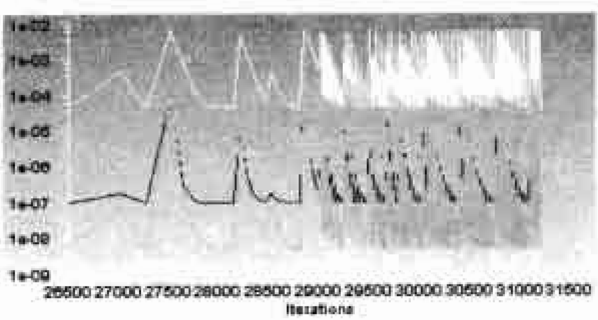


图 4-74　残差曲线

（18）计算停止后，选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的 Graphics and Animations 面板中双击 Animations 栏中的 Solution Animation Playback 按钮，弹出 Playback 对话框，选择动画输出为 Picture Files 格式，并设置图片为彩色，单击 Write 按钮，将每帧动画以图片形式存放在当前工作目录下。然后，利用 Adobe Image Ready 的动画制作功能，将所有帧的图片串接成 gif 格式的动画文件，见结果文件 4-5.gif。

（19）图形分析时，双击 Graphics and Animations 面板中的 Contours 选项，弹出如图 4-75 所示的 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，并在 Contours of 栏中选择 Velocity…和 Velocity Magnitude 选项，单击 Display 按钮，得到如图 4-76 所示的速度云图。然后取消选中 Options 栏中的 Filled 复选框，单击 Display 按钮，得到如图 4-77 所示的速度等值线图。接着在 Contours of 栏中选择 Velocity…和 Vorticity Magnitude 选项，再次选中 Options 栏中的 Filled 复选框，单击 Display 按钮，得到如图 4-78 所示的涡量云图。此时的涡量云图分布并不清晰，原因是显示了涡量的整个取值范围，这里可以改变 Min 和 Max 的值分别为 0 和 2，则可得到如图 4-79 所示的涡量云图。



图 4-75　Contours 对话框

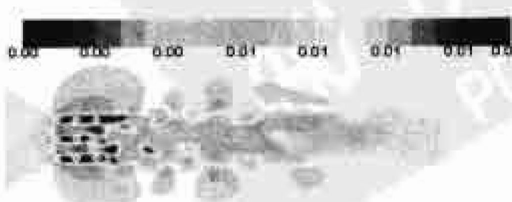


图 4-76　速度云图



图 4-77　速度等值线图

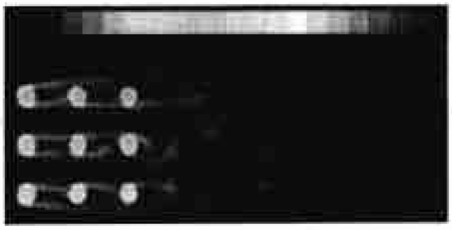


图 4-78　涡量云图

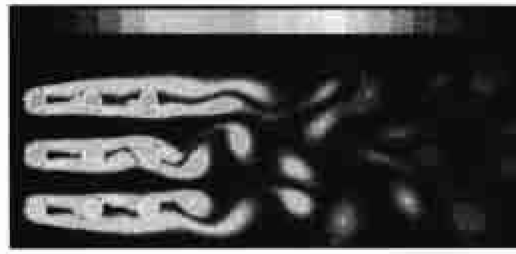


图 4-79　涡量云图

（20）图形分析结束后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（4-5.cas 和 4-5.dat）。

（21）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

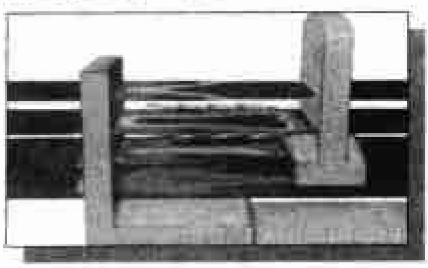
第5讲 传热模型

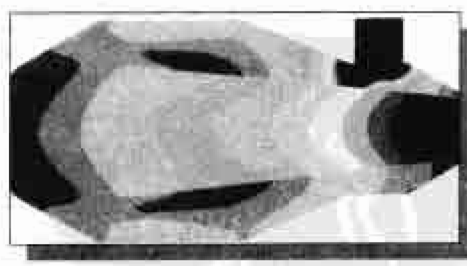
温度差会引起热能的传递，这个过程称为热传递，通常也简称传热。能源、宇航、机械、化工、动力、制冷、建筑、电子电工、生物和环境保护等部门都存在大量的热传递问题。通过传热分析解决工程技术中所遇到的热传递问题，对装置和设备的技术经济性和安全可靠性、热能的有效利用、工艺和生产过程的优化都有着重要的作用。

如第 1 讲中所述，FLUENT 的传热计算需要激活能量方程，通过能量方程中的能量源项来考虑传热问题。根据问题的不同类型，能量源项中可以包括压力做功和动能项、粘性耗散项、组分扩散项、化学反应源项、辐射能源项及相间能量交换源项等各种类型，从而满足用户模拟计算的需要。本讲将介绍传热的各种方法及其相应的应用领域，并通过 3 个实例的讲解帮助读者掌握传热分析的过程。

本讲内容

- 实例·模仿——偏心圆环内自然对流换热
- 传热方法概述
- 传热模型的应用领域
- 传热模型的设置
- 实例·操作——冷热水混合器内部流动及换热
- 实例·练习——室内空调传热





5.1 实例·模仿——偏心圆环内自然对流换热

第 2 讲中绘制了偏心圆环网格，本例只绘制一半的网格模型，采用对称边界条件，即可映射得到另一半。本例尺寸与第 2 讲的实例·模仿中的尺寸一样，计算中，假设圆环内的介质为空气，内壁温度为 380℃，外壁温度为 340℃，模拟由于温差和浮升力作用导致的空气在圆环内的自然对流。

【思路分析】

将偏心圆环网格调入 FLUENT 12，设置为稳态问题，采用绝对速度计算，接着激活能量方程和层流模型，改变空气密度为不可压缩理想流体，设置内外壁面都是定温边界，中间线为对

称边界，随后就可以迭代计算，整个流程如图 5-1 所示。

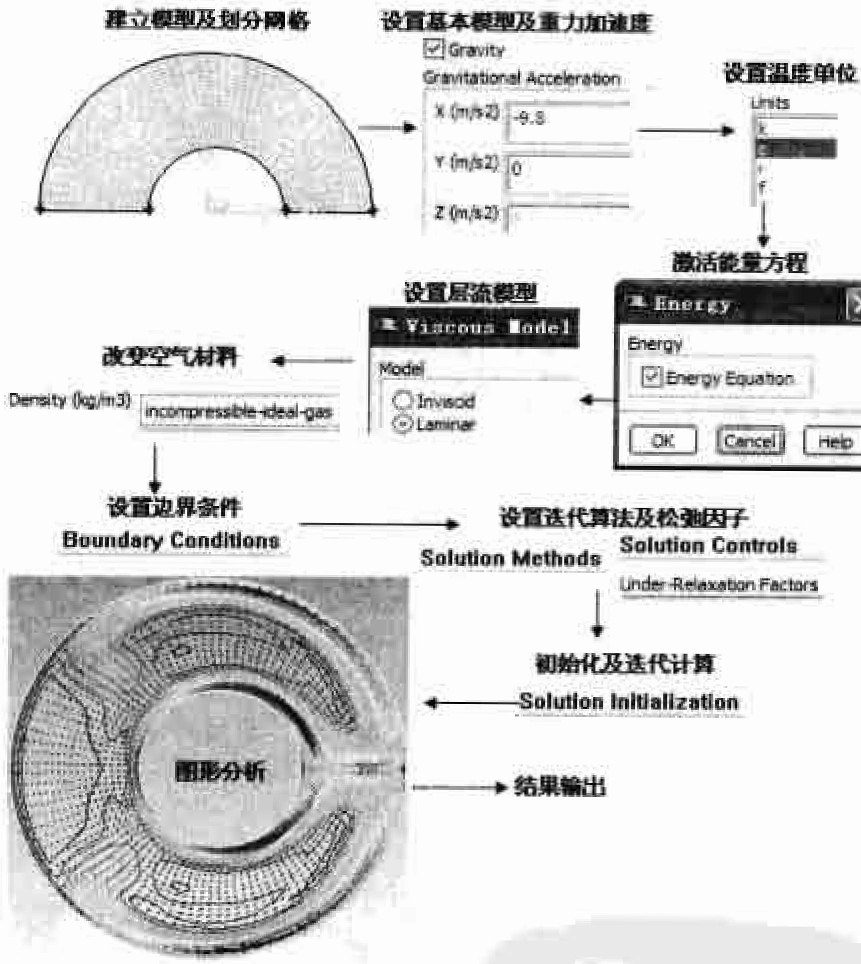


图 5-1　偏心环空自然对流换热模拟流程图

【光盘文件】



——参见附带光盘中的 START\Ch5\5-1.msh 文件。



——参见附带光盘中的 END\Ch5\5-1.cas，5-1.dat 文件。



——参见附带光盘中的 AVI\Ch5\5-1.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器，如图 5-2 所示。

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 5-1.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，网格加载如图 5-3 所示。

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在打开的 General 面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，如图 5-4 所示，单击

Close 按钮关闭对话框。

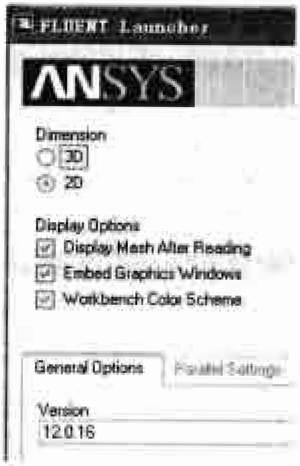


图 5-2　启动 2D 解算器

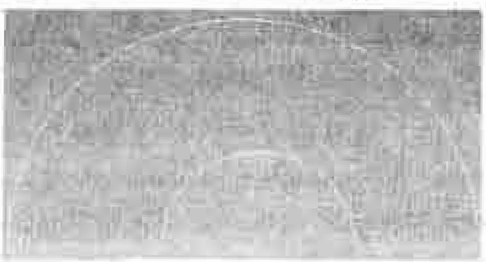


图 5-3　网格

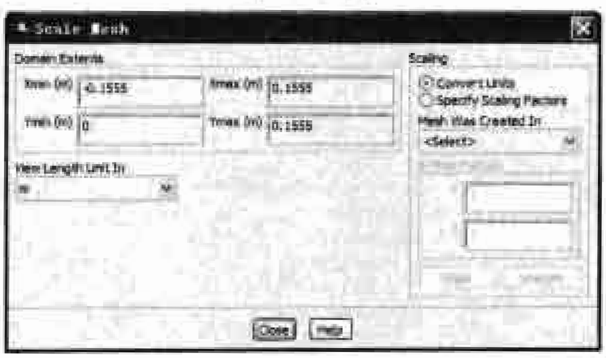


图 5-4　Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 操作面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）在 General 面板的 Solver 栏中进行基本模型设置，这里保持定常模型及绝对速度选项，选中 Gravity 复选框，并设置 X(m/s2) 为-9.8，即考虑在 X 负向存在重力加速度，如图 5-5 所示。

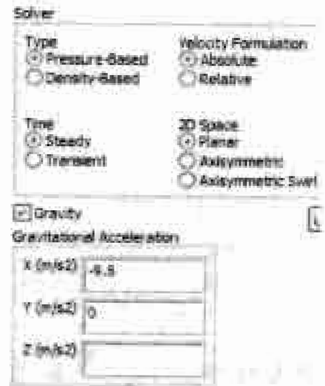


图 5-5　设置重力加速度

（6）单击 Units 按钮，弹出如图 5-6 所示的 Set Units 对话框，在 Quantities 列表框中选择 temperature 选项，设置其单位为 c（FLUENT 12 默认的单位为 k）。

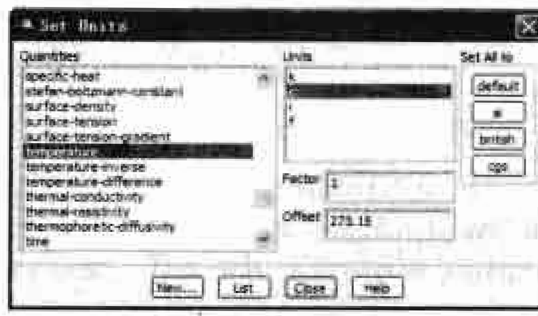


图 5-6　Set Units 对话框

（7）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，双击 Energy-Off 选项，弹出 Energy 对话框，选中能量方程选项。回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框，如图 5-7 所示。选中 Laminar 单选按钮，单击 OK 按钮即可。

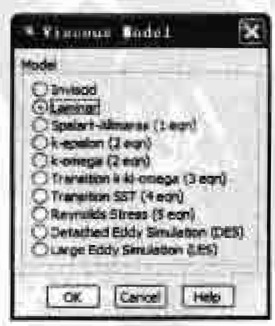


图 5-7　Viscous Model 对话框

（8）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Materials 选项，再单击 Materials 面板中的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，如图 5-8 所示。此时，默认的材料即是空气，在 Density(kg/m3)下拉列表框中选择 incompressible-ideal-gas 选项，单击 Change/Create 按钮，使得圆环中的空气为不可压缩理想流体。



图 5-8　Create/Edit Materials 对话框

（9）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，展开 Cell Zone Conditions 面板，单击 Edit 按钮，弹出 Fluid 对话框，确认 Material Name 中的流体介质为 air，单击 OK 按钮。

（10）单击 Cell Zone Conditions 面板右下角的 Operating Conditions 按钮，弹出操作环境设置对话框，这里保持默认设置，单击 OK 按钮。

（11）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，在展开的 Boundary Conditions 面板中选择 duichen 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Symmetry 对话框，如图 5-9 所示，这里只需单击 OK 按钮即可。回到 Boundary Conditions 面板，选择 neibi 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Wall 对话框，如图 5-10 所示，选择 Thermal 选项卡，设置壁面的温度边界为 Temperature（定温边界），并在 Temperature(c)文本输入框中输入“380”，格式为 constant（常数），单击 OK 按钮。按同样的设置方法，设置外壁面也为定温边界，温度为 340℃。

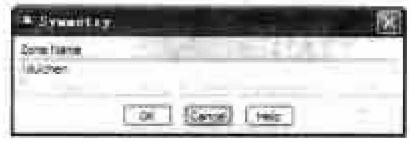


图 5-9　Symmetry 对话框

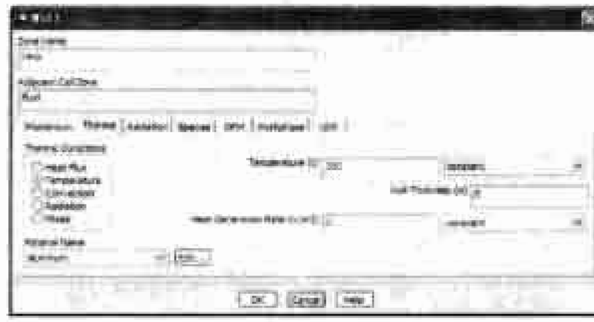


图 5-10　壁面温度设置

（12）边界定义完后，选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，这里保持默认的算法设置，如图 5-11 所示。

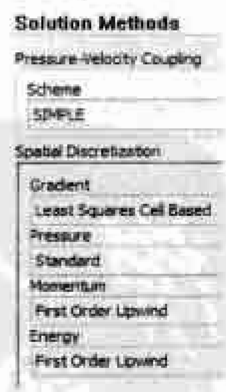


图 5-11　算法设置

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子，如图 5-12 所示。

（14）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 5-13 所示的对话框，设置 energy 的收敛精度为 1e-07，其余设置为 0.0001，单击 OK 按钮。

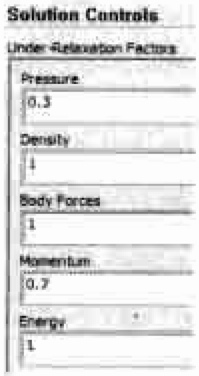


图 5-12　松弛因子

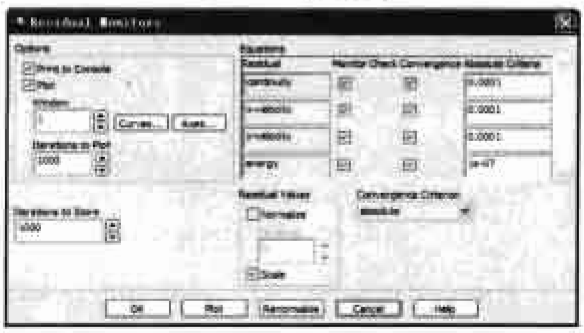


图 5-13　收敛精度设置

（15）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Initialization 选项，设置展开面板中的 Compute from 为 all-zones，如图 5-14 所示，单击 Initialize 按钮，完成初始化。

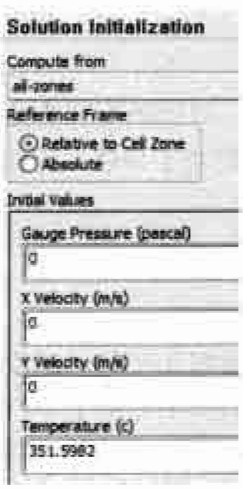


图 5-14　初始化

（16）选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 5-15 所示的面板中设置 Number of Iterations 为 200，单击 Calculate 按钮开始计算。计算结束后的残差曲线如图 5-16 所示。

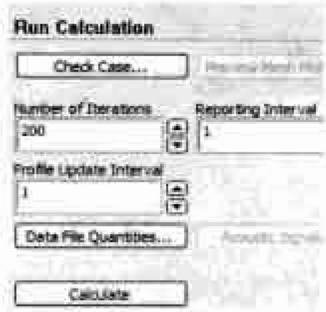


图 5-15　迭代设置

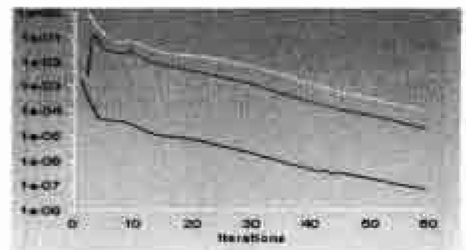


图 5-16　残差曲线

（17）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的 Graphics and Animations 面板中双击 Contours 选项，弹出 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Temperature...和 Static Temperature 选项，单击 Display 按钮，即可看到如图 5-17 所示的温度云图。若在 Contours of 栏中选择 Velocity...和 Velocity Magnitude 选项，则会出现如图 5-18 所示的速度云图。

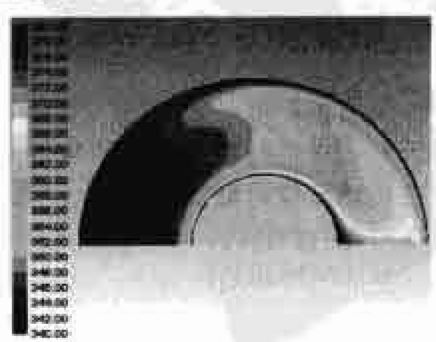


图 5-17　温度云图



图 5-18　速度云图

（18）选择 Display→Views 命令，弹出如图 5-19 所示的对话框，选择 Mirror Planes 列表框中的 duichen 选项，单击 Apply 按钮。



图 5-19　Views 对话框

（19）双击 Graphics and Animations 面板中的 Vectors 选项，弹出 Vectors 对话框，单击 Display 按钮，则得到如图 5-20 所示的速度矢量图。

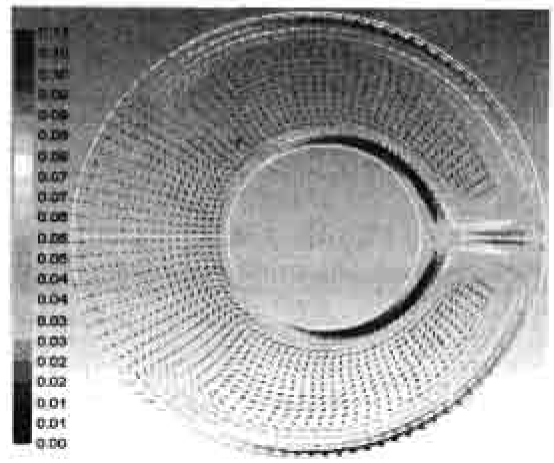


图 5-20　速度矢量图

（20）图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（5-1.cas 和 5-1.dat）。

（21）选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

5.2　传热方法概述

热传递过程是一种复杂的物理现象，按其物理本质的不同，可以把它分为热传导、热对流和热辐射 3 种基本方式。在静止的液体中发生的热传递也主要取决于导热，而在流动的液体及流动或静止不流动的气体中热传递主要靠对流或热辐射。

5.2.1　热传导

热传导简称导热，它是物体中温度不同的各部分之间，或者相互接触的温度不同的各物体之间，没有相对位移时所发生的热传递现象；是一种依靠物质的分子、原子和自由电子等微观粒子的热运动而进行的能量传递过程。导热在固体、液体和气体中均可发生。通常认为纯导热只发生在密实的固体内，但在静止液体中发生的热传递往往也取决于导热。

不同物质的导热机理如下：

- 在气体中导热是气体分子不规则热运动时相互作用或碰撞的结果。
- 在不导电的固体中，导热主要是通过晶格的振动来实现的。

◆ 在金属中，导热主要是通过自由电子的运动、相互作用和碰撞来实现的。

◆ 液体中的导热，近代传热学的观点认为主要是依靠晶格振动和布朗运动实现的。

1822 年，法国数学家傅里叶对热传导现象做了深入的研究，提出了下面的数学式：

$$Q_\lambda = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial n} \tag{5-1}$$

$$q_\lambda = \frac{Q_\lambda}{A} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \tag{5-2}$$

式中：Q_λ 为热流量，W；λ 为导热系数，W/(m·℃)；q_λ 为单位面积的热流量，W/m^2；T 为温度，℃；A 为面积，m^2。

式（5-1）和式（5-2）称为傅里叶定律，是热传导的基本定律，式中的负号表示热量传递的方向与温度梯度的方向相反。该式表明当物质进行纯导热时，单位时间内通过垂直于热流方向上的单位面积的热流量与温度梯度成正比。

导热系数 λ 是物质固有的一种热物理属性，其定义式由傅里叶定律式（5-2）给出：

$$\lambda = -\frac{q_\lambda}{\partial T / \partial n} \tag{5-3}$$

由式（5-3）可以看出，导热系数 λ 在数值上等于每单位温度梯度作用下物体所传导的热流密度值。λ 可用于表示物体导热性能的强弱，其值随物质的种类而异，且还与物质的结构、密度、湿度、温度和压力等因素有关。

◆ 气体的导热系数值约在 0.006~0.6W/(m·℃)范围内。随温度的升高而增大。在 10 个大气压力以下，大多数气体的导热系数仅是温度的函数，与压力无关。

◆ 液体的导热系数约在 0.07~0.7W/(m·℃)之间。液体中，除水和某些水溶液及甘油外，绝大多数液体的导热系数随温度的升高而减小。接近临界点时，压力对液体导热系数无明显影响。

5.2.2 热对流

热对流是指温度不同的各流体微团发生宏观相对位移时引起的能量传递过程。简言之，是依靠流体的运动进行热量传递的现象。热对流只能发生在流动的流体中。

在工程技术领域中所遇到的传热问题，往往涉及流体与固体壁直接接触时的换热。这种流动的流体与固体壁面之间的换热过程，称为对流换热。它的特点是：在贴近壁面处总有一层流体薄层存在，薄层中的热传递依靠导热进行，而在流体薄层外的热传递主要依靠对流进行，如电子元件的散热、冰箱排热管散热、暖气片的散热及冷库中冷却管的吸热等。

对流换热计算公式一直沿用牛顿冷却定律，表达式为：

$$Q_\alpha = \alpha A\left(T_w - T_f\right) \tag{5-4}$$

$$q_\alpha = \alpha\left(T_w - T_f\right) \tag{5-5}$$

式中：Q_α 为单位时间内的对流换热量，W；q_α 为单位时间内单位面积的对流换热量，W/m^2；T_w 为固体壁面温度，℃；T_f 为流体温度，℃；α 为对流换热系数，W/(m^2·℃)；A 为对流换热面积，m^2。

需要注意的是，对流换热系数α与导热系数λ不同，α不是物性参数，而是与流体运动产生的原因、流动的状态、流体有无相变、流体的物性以及壁面的形状和相对位置等许多因素有关的。

FLUENT 可以模拟因流体受热引发密度变化而产生重力差异导致的流体流动，这种流动称为自然对流的浮力驱动流动。

混合对流中，浮力影响可通过格拉晓夫数与雷诺数来判别：

$$\frac{Gr}{Re^2}=\frac{g\beta\Delta TL}{V^2} \tag{5-6}$$

当此数值接近或超过 1.0 时，浮力对流动将有较大影响。相反，若此数较小，浮力的影响可以忽略。

在纯粹的自然对流中，浮力引起的流动强度由瑞利数决定：

$$Ra=\frac{g\beta\Delta TL^3\rho}{\mu\alpha} \tag{5-7}$$

若 $Ra<10^8$，浮力驱动的对流为层流；当 $10^8<Ra<10^{10}$ 时，对流为层流到湍流的过渡态；当 $Ra>10^{10}$ 时，对流为湍流流动。

当模拟封闭区域的自然对流时，密度场的计算是流场计算的关键。FLUENT 有两种方法来计算密度场：

- 对于计算区域内温差较大的情况，将问题按非定常来计算。
- 对于小温差的情况，可以使用 Boussinesq 模型假设，将问题按定常来计算。

5.2.3 热辐射

热传导和热对流都必须通过物体的直接接触进行传热，然而，自然界中还存在着不依靠物体直接接触也能进行热传递的现象。物体通过电磁波的形式向外发射辐射能的现象称为辐射。物体会因各种原因发出辐射能，其中由于温差或热的原因引起的辐射能量的传播过程称为热辐射。

自然界中各个物体都能不停地将其热能转化为辐射能向外发射，同时又不断地吸收来自其他物体的辐射能，并将其转变成热能存储起来。实验表明，物体的辐射能力和温度有关，同一温度下不同物体的辐射和吸收的本领也大不一样。高温物体发射的辐射能比吸收的多，低温物体吸收的多于高温物体的，结果形成辐射换热，总效果是使热量由高温物体传至低温物体。

当热辐射能量投射到物体表面上时，和可见光一样，也会发生吸收、反射和穿透现象。根据被吸收、反射和穿透的能量百分数可以定义该物体对投入辐射的吸收率、反射率和穿透率（三者和为 1）。吸收率为 1 的物体叫黑体，反射率为 1 的物体叫镜体，穿透率为 1 的物体叫透明体。气体中分子结构对称的双原子气体（如氧气、氮气等）实际并无发射和吸收辐射的能力，可认为是热辐射的透明体。但是三原子（如 CO_2）、多原子（CH_4）以及结构不对称的双原子气体（如 CO）却有相当大的辐射能力。气体辐射不同于固体和液体辐射，具有两个突出的特点：

- 气体辐射对波长有选择性。
- 气体辐射和吸收是在整个容积中进行的。

辐射换热是高温条件下换热的主要机制。在相同温度下，黑体的辐射能力最大。它在单位时间内发射的辐射能可按斯蒂芬-玻尔兹曼定律计算：

$$Q=\sigma_b AT^4 \tag{5-8}$$

式中：Q 为辐射能量，W；T 为绝对温度，K；A 为物质的表面积，m^2；σ_b 为黑体辐射常数，$\sigma_b=5.67\times10^{-8}W/(m^2{\cdot}K^4)$。

实际物体的辐射能力均小于相同温度下黑体的辐射能力，其辐射能的计算式为：

$$Q=\varepsilon\sigma_b AT^4 \tag{5-9}$$

式中：ε 为物体的发射率，也称黑度。

对于两个互相平行且十分接近的黑体，表面之间进行的辐射换热量可按下式计算：

$$Q=\sigma_b A\left(T_1^4-T_2^4\right) \tag{5-10}$$

式中：T_1 为高温表面的绝对温度，K；T_2 为低温表面的绝对温度，K。

可见，辐射换热与导热、对流换热不同，其特点如下：

- 不仅有能量的传递，而且有能量形式的转换，即从热能转变为辐射能，或从辐射能转变为热能。
- 不必借助于中间介质，在真空中也能进行。
- 在发射辐射能的同时也在吸收。

在 FLUENT 中，可以用 5 种模型来计算辐射换热问题，分别为离散换热辐射模型（DTRM）、P-1 辐射模型、Rosseland 辐射模型、表面辐射模型（S2S）和离散坐标辐射模型（DO）。

- 离散换热辐射模型（DTRM）：是一个比较简单的模型，可以通过增加射线数量来提高计算精度，同时这个模型可用于任何光学厚度。该模型假设所有表面都是漫射表面，即所有入射的辐射射线没有固定的反射角，而是均匀地反射到各个方向。计算中没有考虑辐射的散射效应，且假设辐射是灰体辐射。如果采用大量射线进行计算，会给 CPU 增加很大负担。DTRM 模型不能用于动网格或存在拼接网格界面的情况，也不能用于并行计算。
- P-1 辐射模型：其辐射换热方程是一个计算量相对较小的扩散方程。在燃烧等光学厚度很大的计算问题中，P-1 辐射模型的计算效果较好。P-1 辐射模型还可以在采用曲线坐标系的情况下计算复杂几何形状的问题。然而，P-1 辐射模型也假设所有表面都是漫射表面，即所有入射的辐射射线没有固定的反射角，而是均匀地反射到各个方向。另外，该模型也采用灰体假设。如果光学厚度较小，计算精度会受到几何复杂程度的影响。
- Rosseland 辐射模型：它不用像 P-1 辐射模型那样计算额外的输运方程，因此，该模型的计算速度较快，需要的内存较少。但是该模型只能用于光学厚度大于 3 的问题，同时计算中只能采用压力基求解器进行计算。
- 表面辐射模型（S2S）：用于计算在没有参与性介质的封闭空间内的辐射换热计算，如飞船散热系统、太阳能集热器和汽车机箱内的冷却过程等。虽然 S2S 模型视角因子的计算需要占用较多的 CPU 时间，但其每个迭代步计算速度很快。与 DTRM 和 P-1 模型一样，S2S 模型也假设所有表面都是漫射表面，并采用灰体辐射模型进行计算。S2S 模型不能计算有参与性辐射介质的问题，不能用于带周期性边界条件或对称边界条件的计算，不能用于二维轴对称问题的计算，也不能用于多种封闭区域的辐射计算，只能用于单一封闭几何形状的计算。另外，S2S 模型也不适用于拼接网格界面、悬挂节点

存在的情况和网格的自适应计算。

- 离散坐标辐射模型（DO）：是使用范围最大的模型，它可以计算所有光学厚度的辐射问题，并且计算范围涵盖了从表面辐射、半透明介质辐射到燃烧问题中出现的参与性介质辐射在内的各种辐射问题。DO 模型采用灰带模型进行计算，因此，既可以计算灰体辐射，也可以计算非灰体辐射。如果网格划分不是特别细，计算所占用的 CPU 时间并不大，所以，DO 模型成为计算中经常使用的一个模型。

选择辐射模型的主要标准如下：

- 光学厚度。光学厚度远大于 1 时，最好选用 P-1 和 Rosseland 模型；光学厚度大于 3 时，选用 Rosseland 模型；对于更高的光学厚度，推荐使用 DO 模型和二阶离散格式；DTRM 和 DO 模型对任何光学厚度都适用；对于光学厚度小于 1 的问题，则只能使用 DTRM 和 DO 模型。
- 散射率和发射率。P-1、Rosseland 和 DO 模型均可以计算散射问题，而 DTRM 模型则忽略了散射的影响。
- 颗粒效应。只能使用 P-1 和 DO 模型计算气体与颗粒间的辐射换热。
- 半透明介质与镜面边界。只能使用 DO 模型。
- 非灰体辐射。只能使用 DO 模型。
- 局部热源问题。推荐使用 DO 模型，如果采用足够多的射线数目，还可以采用 DTRM 模型。
- 封闭腔内没有参与性辐射介质的情况。S2S 模型最为适用。
- 外部辐射问题。如果要考虑计算区域外部的辐射影响，那么，在模型边界定义时要使用外部辐射边界条件。如果不关心计算区域内部的辐射，仅考虑外部辐射的影响，只需要用户在边界定义时使用外部辐射边界条件即可。

5.3 传热模型的应用领域

FLUENT 12 可以模拟绝大部分工程所需解决的热传递问题，下面只列举其中的一部分。

- 温差异重流。
- 加热、保温问题。
- 混合器内的流动换热。
- 钻井工程中深井的井温分布问题。
- 固井时水泥浆在井内所处的温度场问题。
- 浸泡问题。
- 润滑问题。
- 换热器的结构优化与应用。
- 采暖、通风和空调工业中的空间传热问题。
- 汽车工业中车厢的传热分析。
- 玻璃加工、玻璃纤维拉拔和陶瓷加工过程中的辐射。
- 热油管道的加热输送及停输温降问题。

- 火焰辐射问题。
- 表面辐射加热或冷却问题。
- 辐射、对流和热传导的耦合传热问题。
- 气体与颗粒之间的辐射换热问题。
- 飞船散热系统传热问题。
- 太阳能集热器传热问题。

5.4 传热模型的设置

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch5\5-4.avi 文件。

利用 FLUENT 12 求解传热问题时首先需要激活能量方程，选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，在打开的 Models 面板中双击 Energy 选项，选中打开的 Energy 对话框中的 Energy Equation 复选框即可。

有时还需要考虑粘性加热作用，如润滑问题和高速压缩流动问题等，需要用户在 Viscous Model 对话框中选中 Viscous Heating 复选框，如图 5-21 所示。

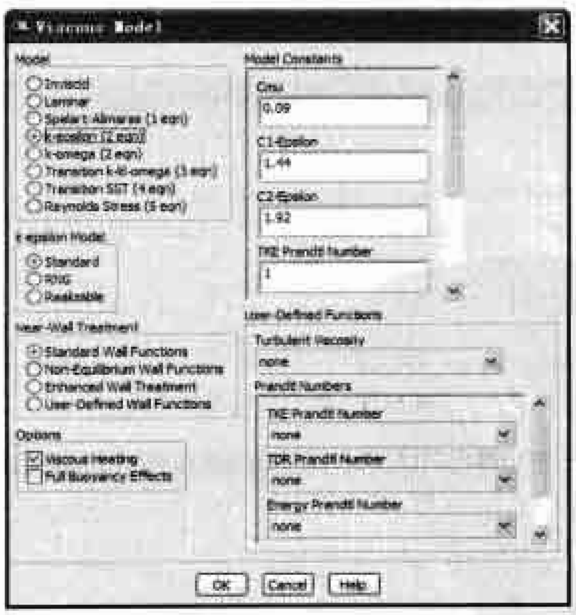


图 5-21　选择粘热效应

传热问题中，流动入口、出口及壁面上的热边界条件也需要特别设置：

- 对于入口、出口边界（包括速度入口、压力入口和压力出口），用户只需在入口（Velocity Inlet 或 Pressure Inlet）、出口（Pressure Outlet）边界条件设置对话框的 Thermal 选项卡中改变 Temperature(K)的值即可。FLUENT 默认进、出口边界上的温度均为 300K，如图 5-22~图 5-24 所示。
- FLUENT 提供的壁面热边界类型有 5 个，分别为热流边界条件、温度边界条件、对流

换热边界条件、辐射边界条件以及辐射和对流混合边界条件，如图 5-25 所示。FLUENT 默认在壁面上使用零热流（绝热）边界条件。

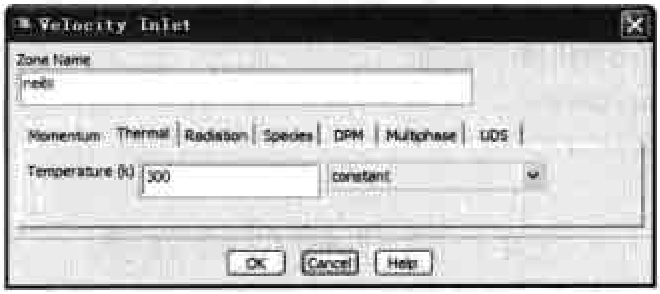


图 5-22 速度入口温度设置



图 5-23 压力入口温度设置

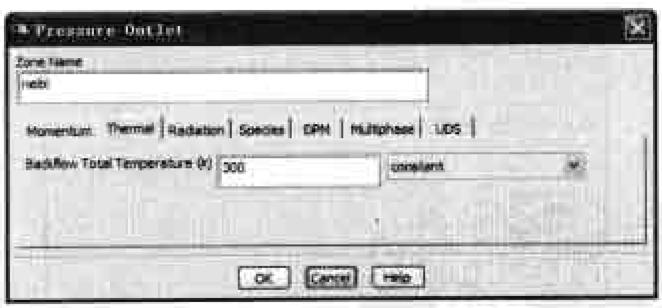


图 5-24 压力出口温度设置

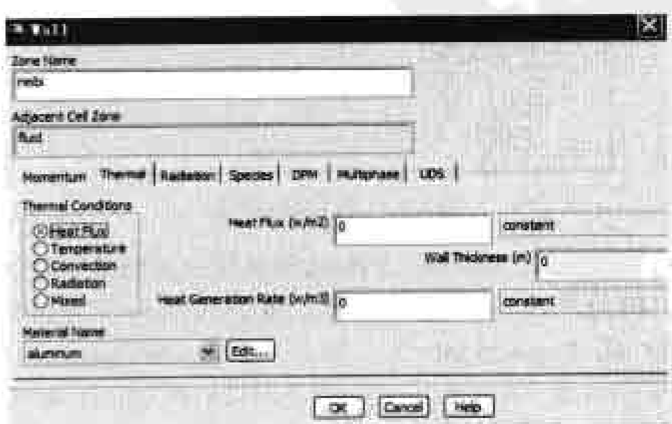


图 5-25 壁面边界温度设置

计算传热问题时，需要用到流体和固体介质的热物理参数。用户可在材料对话框中设置介质的比热和导热系数等。

出于计算稳定性的考虑，FLUENT 对计算过程的温度范围进行了限制，上限为 5000K，下限为 1K。进行温度的限制主要是为了保证传热计算的真实性，因为根据物理特性，现实中的温度应该处于这样的一个范围内。如果在计算的过程中，温度超出了上限，则温度将遏制于 5000K，若温度低于下限，则遏制于 1K。若实际传热问题的温度确实超过 5000K，则用户可以修改温度上限，方法为：在 Solution Controls 面板中单击 Limits 按钮，弹出如图 5-26 所示的 Sloution Limits 对话框，改变 Maximum Static Temperature(k)的值。

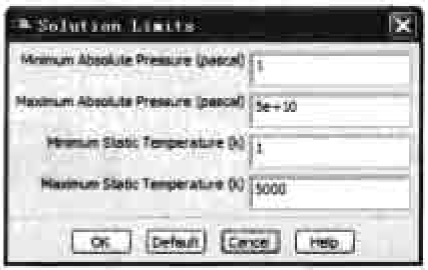


图 5-26　Solution Limits 对话框

5.5　实例・操作——冷热水混合器内部流动及换热

冷热水混合器经常用于工业流体的加热或冷却，如图 5-27 所示。冷热流体从两侧沿水平切向流入，在容器内混合后从下方的渐缩锥形流道流出，涉及强烈的流动换热问题，那么，容器内流体的温度分布如何？流动是否对温度造成极大影响呢？下面以图 5-27 所示的冷热水换热器为例，模拟流体在容器内部的流动及换热问题。混合器冷热水入口和底部出口的管径均为 0.1m，底部锥形段高 0.2m，其余尺寸如图 5-28 所示。冷热水流速均为 1m/s，冷水入口温度为 20℃，热水入口温度为 50℃。

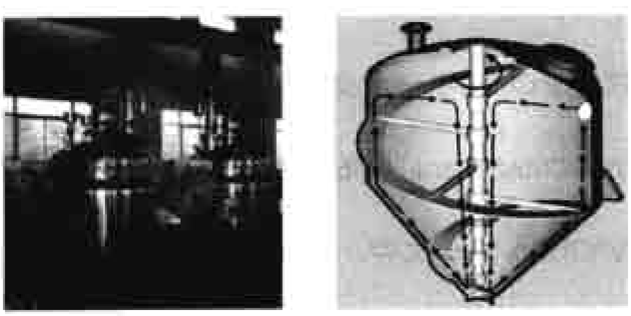


图 5-27　冷热流体混合器

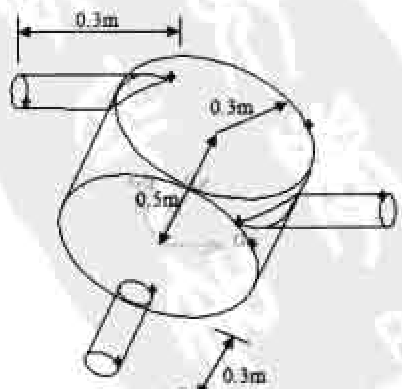


图 5-28　混合器尺寸

【思路分析】

本例的几何模型可以采用直接建体后布尔和生成，网格可以采用非结构网格。在 FLUENT 12 中计算时，冷热水入口都应为速度入口，底部出口为压力出口，并启用能量方程，以进行热量交换的计算，整个流程如图 5-29 所示。

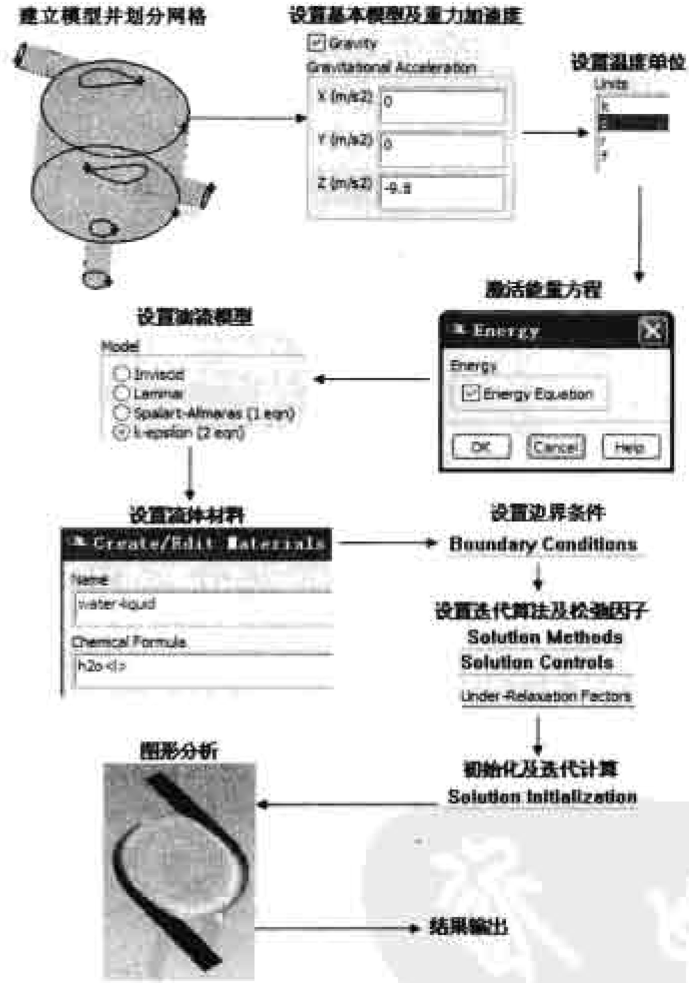


图 5-29 冷热水混合器内部流动及换热模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch5\5-5.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch5\5-5.cas，5-5.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch5\5-5.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 3D 解算器，如图 5-30 所示。

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 5-5.msh 文件，

并将其导入至 FLUENT 12 中，网格加载如图 5-31 所示。

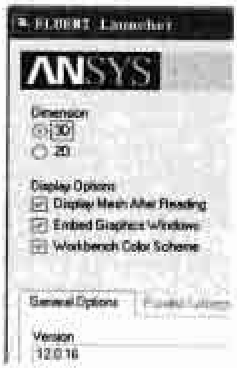


图 5-30　启动 3D 解算器



图 5-31　网格

（3）单击 General 面板中的 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，如图 5-32 所示，单击 Close 按钮关闭对话框。

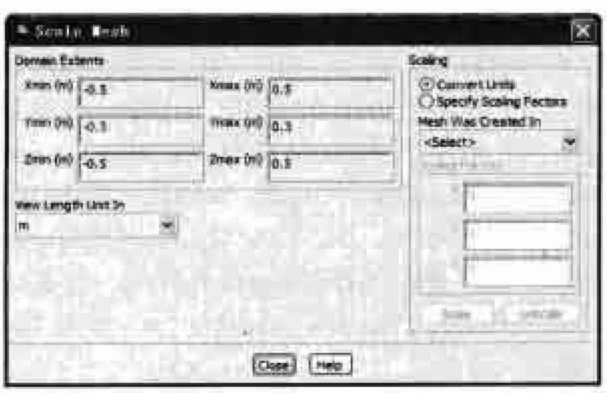


图 5-32　Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）在 General 面板的 Solver 栏中进行基本模型设置，这里保持定常模型及绝对速度选项，选中 Gravity 复选框，并设置 Z(m/s2) 为-9.8，即考虑在 Z 轴负向存在重力加速度，如图 5-33 所示。

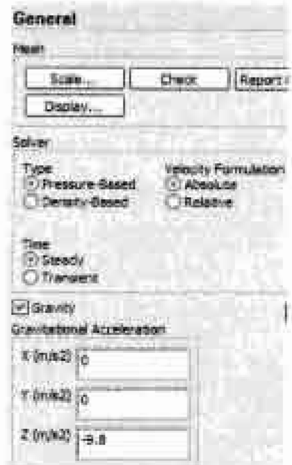


图 5-33　设置重力加速度

（6）单击 Units 按钮，弹出如图 5-34 所示的 Set Units 对话框，在 Quantities 列表框中选择 temperature 选项，设置其单位为 c（FLUENT 12 默认的单位为 k）。

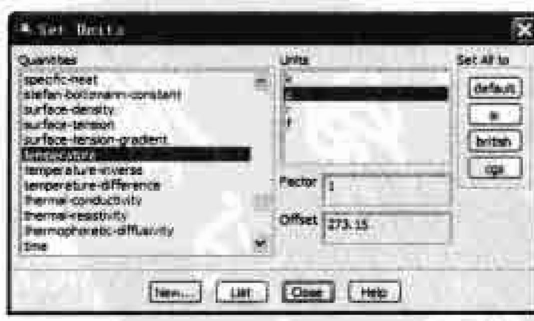


图 5-34　Set Units 对话框

（7）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，在打开的 Models 面板中双击 Energy-Off 选项，弹出 Energy 对话框，选中能量方程选项，如图 5-35 所示。双击 Models 面板中的 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框，如图 5-36 所示，选中

Standard 和 k-epsilon 单选按钮，单击 OK 按钮。

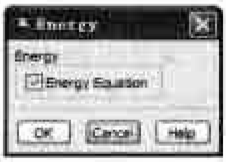


图 5-35　Energy 对话框

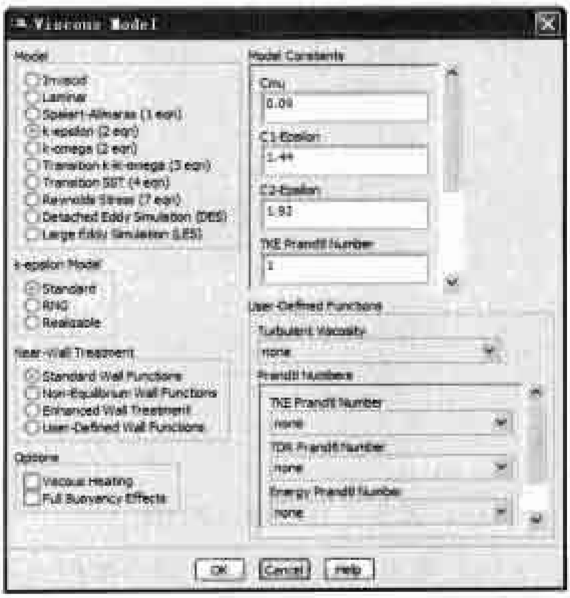


图 5-36　Viscous Model 对话框

（8）选择 Problem Setup 下的 Materials 选项，然后单击打开的 Materials 面板中的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，单击 FLUENT Database 按钮，弹出 FLUENT Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表框中的 water-liquid 选项，单击 Copy 按钮，即将 FLUENT 自带材料数据库中的水调用到当前工程中来。回到 Create/Edit Materials 对话框，即可看到流体材料列表框中已经有水。单击 Close 按钮，关闭 Create/Edit Materials 对话框。

（9）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，展开 Cell Zone Conditions 面板，单击 Edit 按钮，弹出 Fluid 对话框，在 Material Name 下拉列表框中选择流体介质为 water-liquid，如图 5-37 所示，单击 OK 按钮。

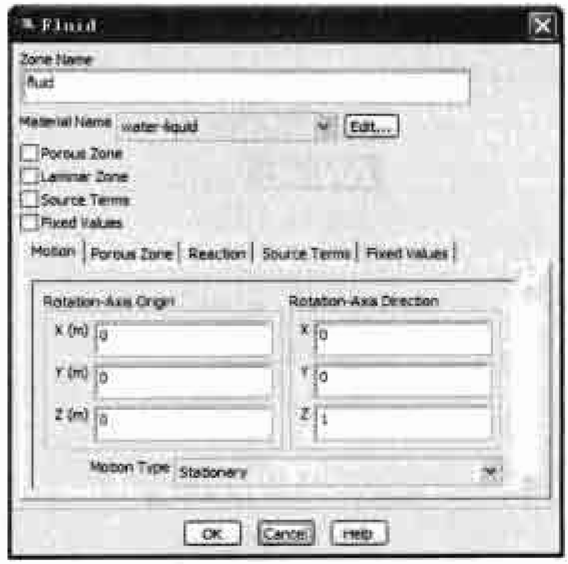


图 5-37　Fluid 对话框

（10）选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，在 Boundary Conditions 面板中选择 in-cold 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 5-38 所示的 Velocity Inlet 对话框，在 Velocity Magnitude(m/s) 数据输入框中输入“1”，设置 Turbulence 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter、Turbulent Intensity(%) 为 5、Hydraulic Diameter(m) 为 0.1。然后选择 Thermal 选项卡，设置冷水入口的温度 Temperature(c)为 20，如图 5-39 所示，单击 OK 按钮。按同样的设置方法，设置热水入口边界。入口设置完后，在 Boundary Conditions 面板中选择 out 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 5-40 所示的 Pressure Outlet 对话框，保持总压为 0，设置 Turbulence 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Backflow Turbulent Intensity(%)为 10、Backflow Hydraulic Diameter (m)为 0.1。然后选择 Thermal 选项卡，设置出口回流的温度 Temperature(c)为 25，单击 OK 按钮。

（11）边界定义完后，选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，这里保持默认的算法设置，如图 5-41 所示。

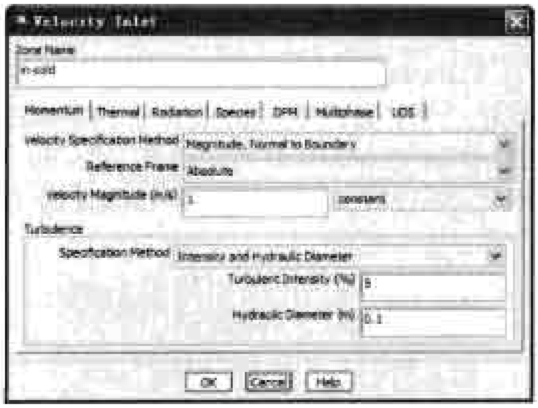


图 5-38　Velocity Inlet 对话框



图 5-39　冷水入口温度设置

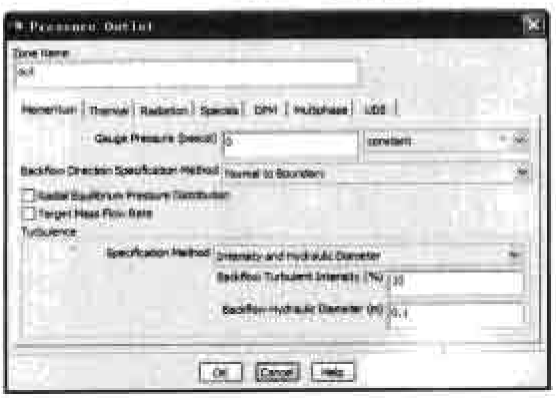


图 5-40　Pressure Outlet 对话框

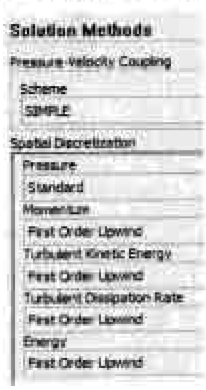


图 5-41　算法设置

（12）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子，如图 5-42 所示。

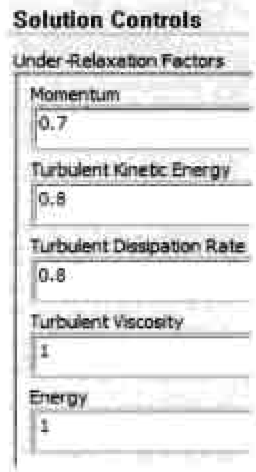


图 5-42　松弛因子设置

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在展开的面板中选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 5-43 所示的对话框，这里保持默认设置，单击 OK 按钮。

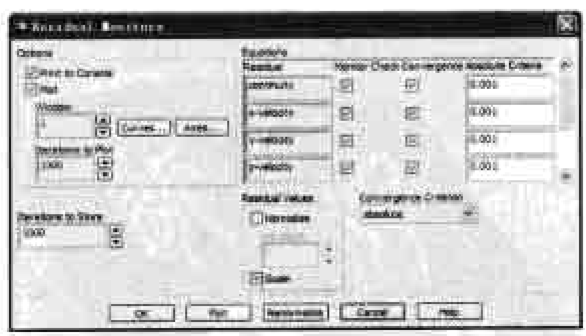


图 5-43　收敛精度设置

（14）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Initialization 选项，选择展开面板中 Compute from 为 all-zones，如图 5-44 所示，单击 Initialize 按钮，完成初始化。

（15）选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，设置 Number of Iterations 为 1000，单击 Calculate 按钮开始计算。计算结束后的残差曲线如图 5-45 所示。

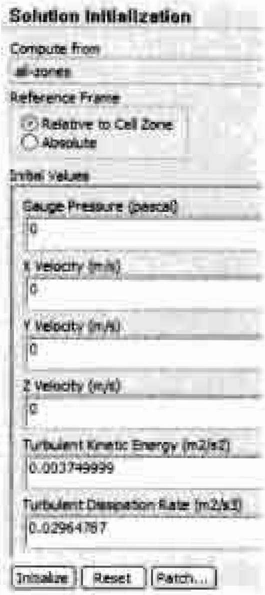


图 5-44 初始化

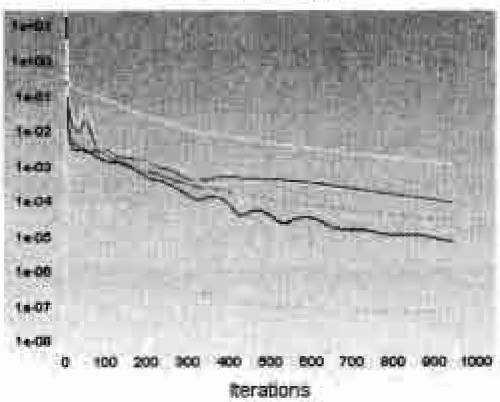


图 5-45 残差曲线

（16）为了能够显示计算结果，定义两个面（一个是混合器的纵向剖面，一个是过冷热水入口的横向剖面）。选择 Surface→Plane 命令，弹出 Plane Surface 对话框，利用 3 点生成一个面，在 Points 下方输入 3 点坐标，并定义 New Surface Name 为 zh 和 hh，单击 Create 按钮生成两个辅助剖面。

（17）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的 Graphics and Animations 面板中双击 Contours 选项，弹出 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Temperature...和 Static Temperature 选项，并选中 Surfaces 列表框中的 zh 和 hh，单击 Display 按钮，即可看到如图 5-46 所示的温度云图。若在 Contours of 栏中选择 Velocity...和 Velocity Magnitude 选项，则会出现如图 5-47 所示的速度云图。

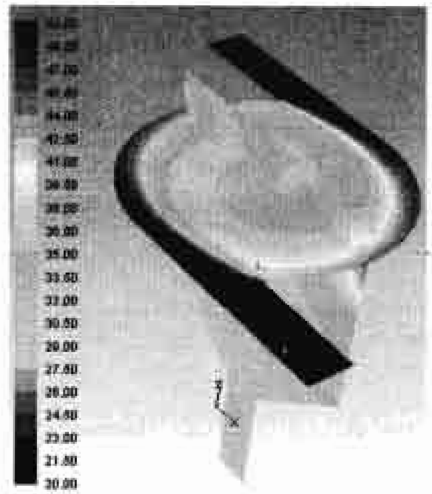


图 5-46 温度云图

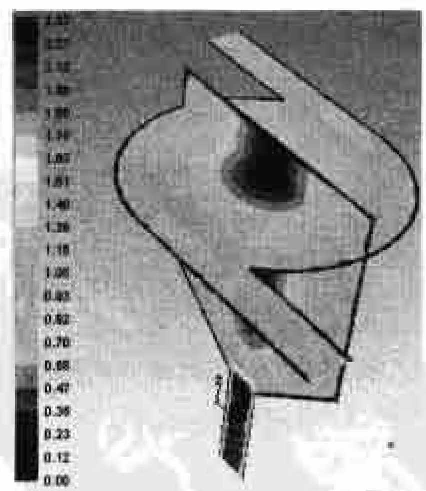


图 5-47 速度云图

（18）双击 Graphics and Animations 面板中的 Vectors 选项，弹出 Vectors 对话框，设置矢量箭头大小（Scale）为 4，跳跃显示（Skip）为 10，并选择 Surfaces 列表框中的 zh 和 hh 选项，如图 5-48 所示，单击 Display 按钮，则得到如图 5-49 所示的速度矢量图。

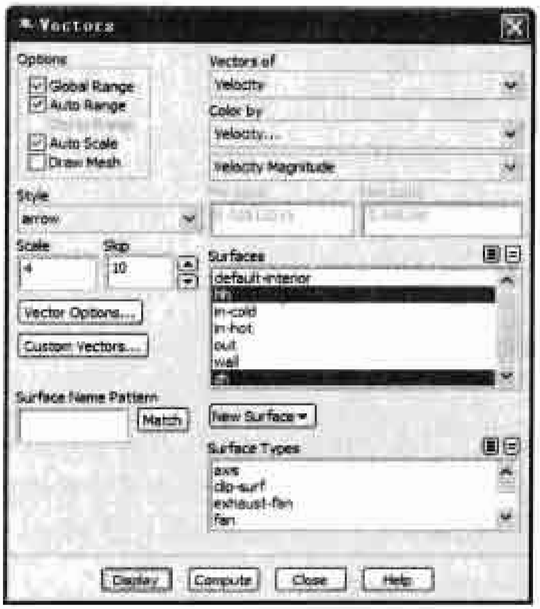


图 5-48　Vectors 对话框

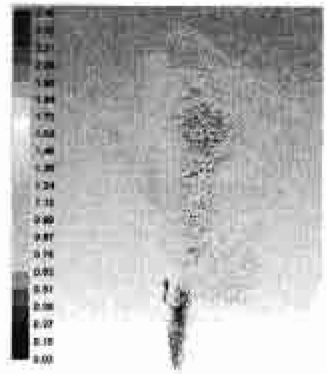


图 5-49　速度矢量图

（19）图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（5-5.cas 和 5-5.dat）。

（20）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

5.6　实例·练习——室内空调传热

空调是目前家居、办公必不可少的电器，如图 5-50 所示，空调的大小要根据房间个数及面积来决定，只有合理的空调功率和布置方位，才能使用户达到满意的使用效果。这种满意的效果其实是建立在合适的室内温度场之上的，只有合适的室内温度场，才能使人员感觉舒适。那么，空调房内的温度场究竟如何？下面利用 FLUENT 12 来进行模拟计算。

这里模拟 3 间房只安装一个空调的情况，3 间房间长为 5m，总宽 12m（每间 4m），具体尺寸如图 5-51 所示。



图 5-50　空调

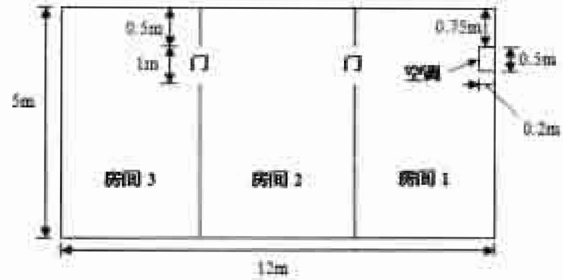


图 5-51　计算区域尺寸

【思路分析】

这里建立二维的几何模型，在 GAMBIT 中划分网格，并在空调安置的那个房间采用加密网格。导入 FLUENT 中后，激活能量方程，设置空调的出入口边界，并设置墙壁与外界的换热系数及墙壁的温度，然后开始迭代计算，最终得到 3 间房的温度场分布，整个流程如图 5-52 所示。

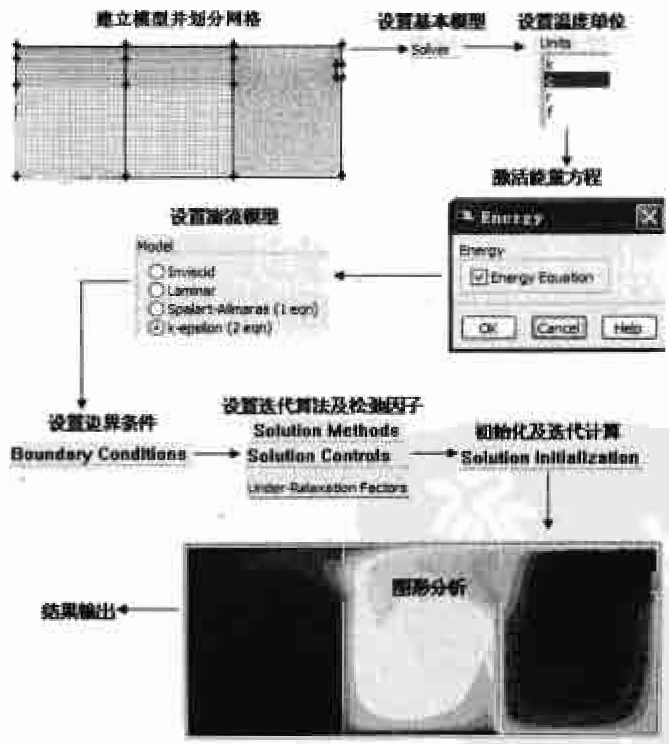


图 5-52　室内空调传热模拟计算流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch5\5-6.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch5\5-6.cas，5-6.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch5\5-6.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器，如图 5-53 所示。

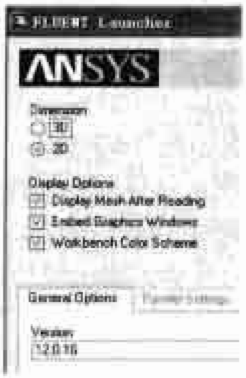


图 5-53 启动 2D 解算器

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 5-6.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，网格加载如图 5-54 所示。

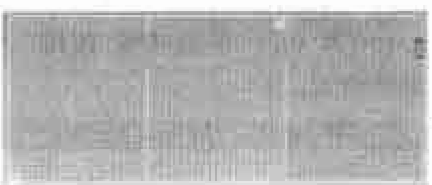


图 5-54 网格

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在打开的 General 面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，如图 5-55 所示，单击 Close 按钮关闭对话框。

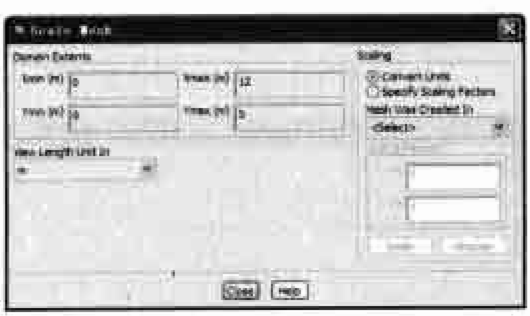


图 5-55 Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）General 面板的 Solver 栏中选项均保持默认设置。

（6）单击 Solver 栏中的 Units 按钮，弹出如图 5-56 所示的 Set Units 对话框，在 Quantities 列表框中选择 temperature 选项，设置其单位为 c。

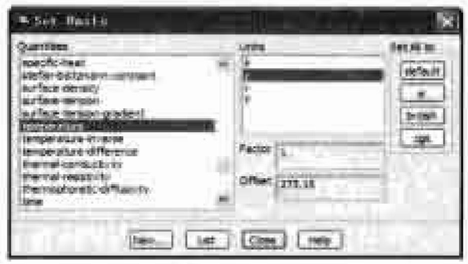


图 5-56 Set Units 对话框

（7）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，在打开的 Models 面板中双击 Energy-Off 选项，弹出 Energy 对话框，选中能量方程选项。回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框，如图 5-57 所示。选中 k-epsilon(2 eqn)单选按钮，并选择 k-epsilon Model 为 Standard，单击 OK 按钮。

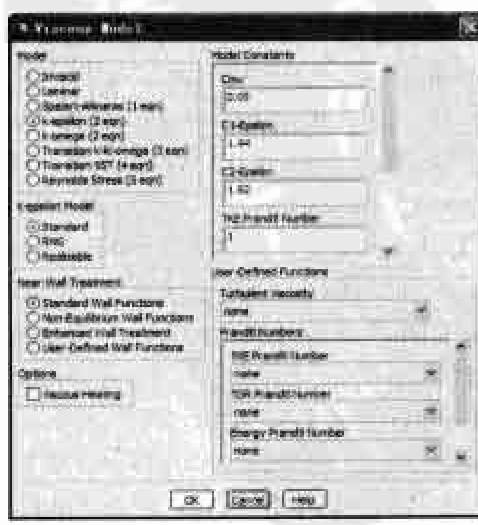


图 5-57 Viscous Model 对话框

（8）选择 Problem Setup 下的 Materials 选项，再单击 Materials 面板中的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框。FLUENT 默认的材料即是空气，如图 5-58 所示，这里无须更改，单击 Close 按钮。

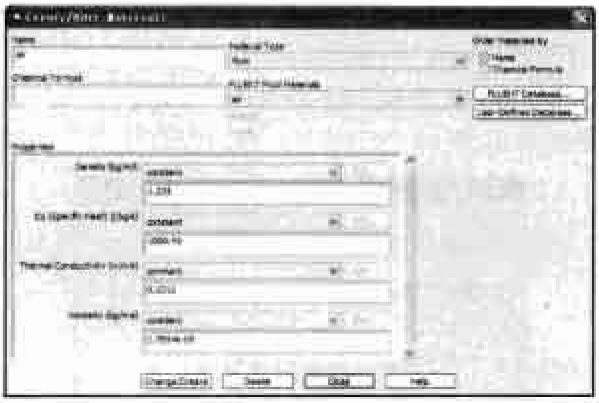


图 5-58　Create/Edit Materials 对话框

（9）选择 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，展开 Cell Zone Conditions 面板，单击 Edit 按钮，弹出 Fluid 对话框，确认 Material Name 下拉列表框中的流体介质为 air，单击 OK 按钮。

（10）单击 Cell Zone Conditions 面板右下角的 Operating Conditions 按钮，弹出操作环境设置对话框，这里保持默认，单击 OK 按钮。

（11）选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，在 Boundary Conditions 面板中选择 in 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，如图 5-59 所示，在 Velocity Magnitude(m/s) 数据输入框中输入“0.1”，设置 Turbulence 的方式为 k and Epsilon，设置 Turbulent Kinetic Energy(m2/s2) 为 0.02、Turbulent Dissipation Rate(m2/s3) 为 0.008。然后选择 Thermal 选项卡，设置入口温度 Temperature(c) 为 22，如图 5-60 所示，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板中选择 out 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Outflow 对话框，如图 5-61 所示，保持默认设置，单击 OK 按钮。再次回到 Boundary Conditions 面板中选择 bi-1 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Wall 对话框，如图 5-62 所示，选择 Thermal 选项卡，这里 Thermal Conditions 默认为 Coupled（即墙壁的双侧温度耦合计算），设置 Wall Thickness(m) 为 0.2（即使墙厚为 20cm），单击 Edit 按钮，弹出如图 5-63 所示的 Edit Material 对话框，更改默认材料铝的物性参数，使得墙壁材料更贴近实际，具体参数设置如图 5-63 所示。设置完后，单击 Change 按钮，回到 Wall 对话框，单击 OK 按钮。按照同样的方法设置另一个房间间隔墙壁（bi-2）的边界。最后，还需设置外墙壁的边界，回到 Boundary Conditions 面板中选择 wall 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Wall 对话框，如图 5-64 所示，选择 Thermal 选项卡，这里选择 Thermal Conditions 为 Convection，设置 Heat Transfer Coefficient(w/m2-k) 为 10，Free Steam Temperature(c) 为 38，墙厚 Wall Thickness(m) 为 0.2，单击 OK 按钮。完成本例边界的所有设置。

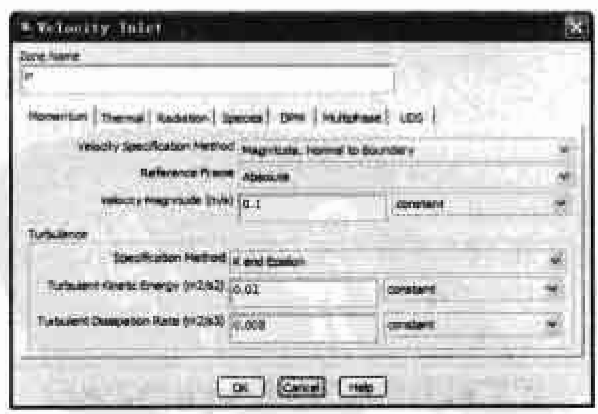


图 5-59　Velocity Inlet 对话框



图 5-60　入口温度设置



图 5-61　出口边界设置

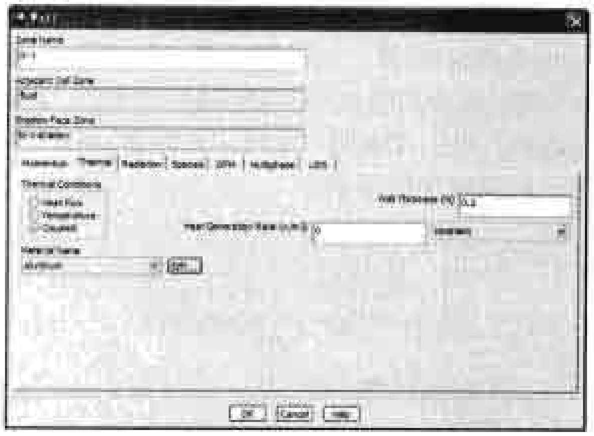


图 5-62　房间间隔墙壁设置

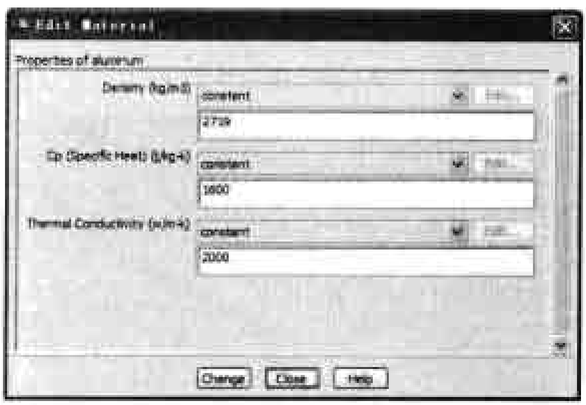


图 5-63　墙壁材料属性设置

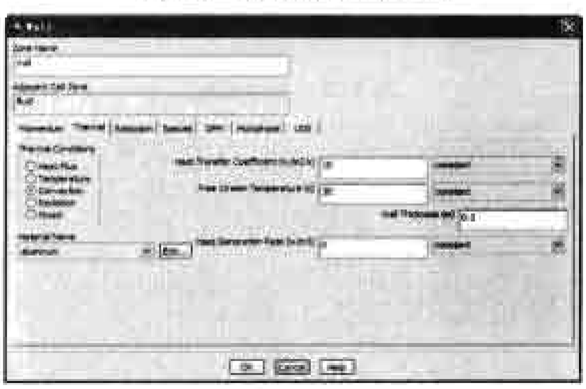


图 5-64　外墙壁面设置

（12）边界定义完后，选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，这里保持默认算法设置，如图 5-65 所示。

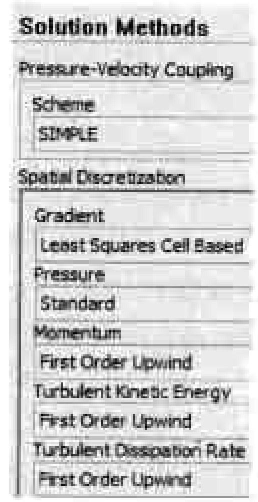


图 5-65　算法设置

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子，如图 5-66 所示。

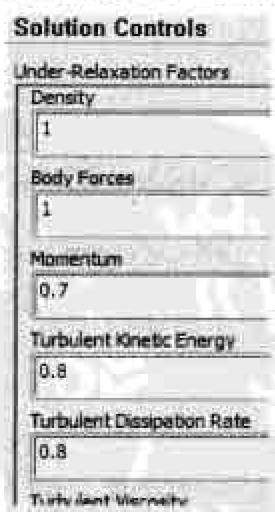


图 5-66　松弛因子

（14）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在展开的面板中选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 5-67 所示的 Residual Monitors 对话框，

保持默认设置，单击 OK 按钮。

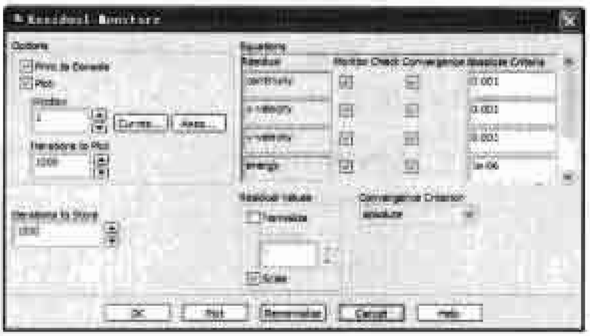


图 5-67　收敛精度设置

（15）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Initialization 选项，选择展开面板中 Compute from 为 in，如图 5-68 所示，单击 Initialize 按钮，完成初始化。

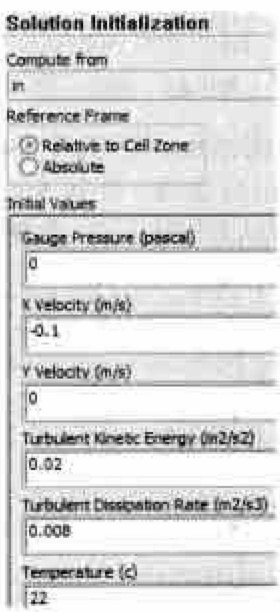


图 5-68　初始化

（16）选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 5-69 所示的面板中设置 Number of Iterations 为 1000，单击 Calculate 按钮开始计算。计算结束后的残差曲线如图 5-70 所示。

（17）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的 Graphics and Animations 面板中双击 Contours 选项，弹出 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Pressure…和 Static Pressure 选项，单击 Display 按钮，即可看到如图 5-71 所示的压强云图。若在 Contours of 栏中选择 Velocity…和 Velocity Magnitude 选项，则会出现如图 5-72 所示的速度云图。若选择 Temperature…和 Static Temperature 选项，则得到如图 5-73 所示的温度云图。若此时取消选中 Options 栏中的 Filled 复选框，单击 Display 按钮，可得到如图 5-74 所示的温度等值线图。

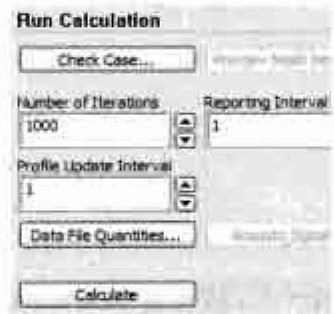


图 5-69　迭代设置

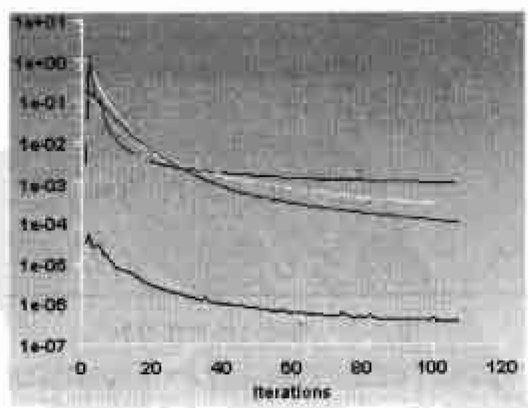


图 5-70　残差曲线

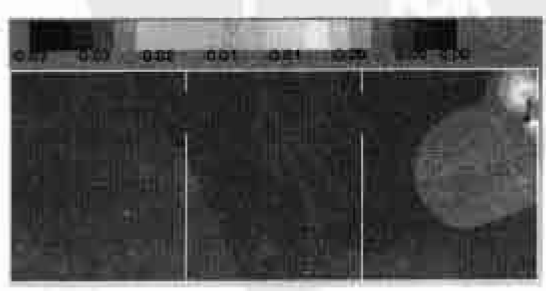


图 5-71　压强云图

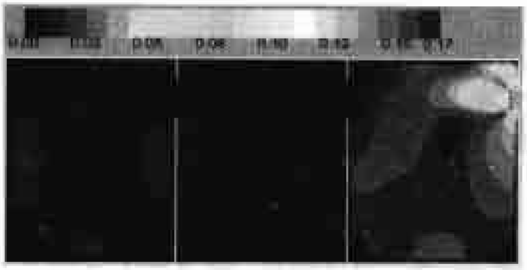


图 5-72　速度云图

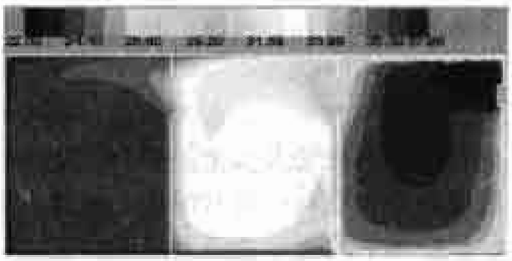


图 5-73　温度云图

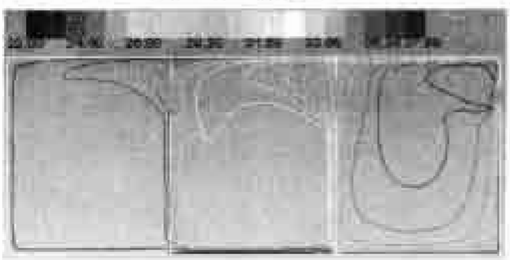


图 5-74　温度等值线图

（18）双击 Graphics and Animations 面板中的 Vectors 选项，弹出如图 5-75 所示的 Vectors 对话框，设置矢量箭头大小（Scale）为 10，跳跃显示（Skip）为 2，单击 Display 按钮，则得到如图 5-76 所示的速度矢量图。按住鼠标中键，由左上角向右下角框选空调附近的计算区域，可以将空调附近的局部矢量图放大显示，如图 5-77 所示。

（19）图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（5-6.cas 和 5-6.dat）。

（20）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

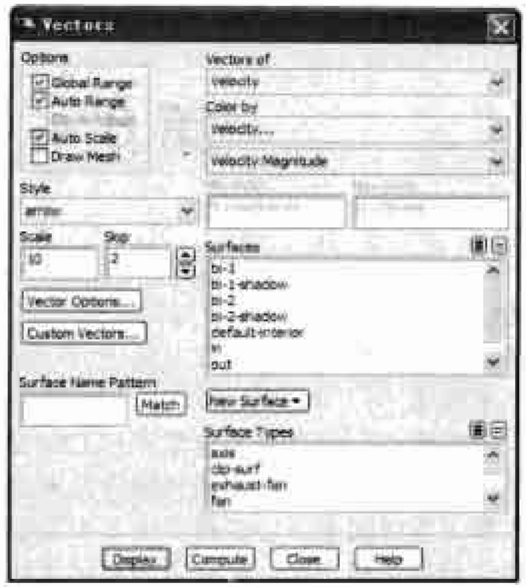


图 5-75　Vectors 对话框

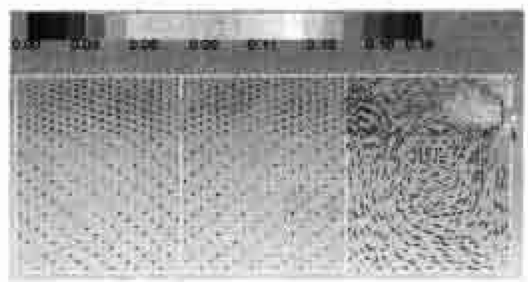


图 5-76　速度矢量图

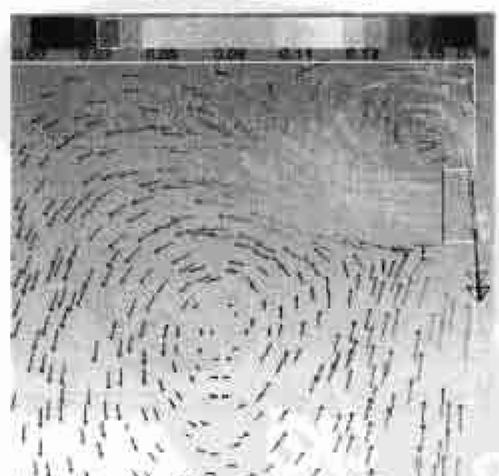


图 5-77　放大的空调附近速度矢量图

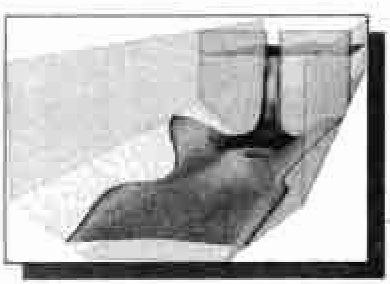
第 6 讲　多相流模型

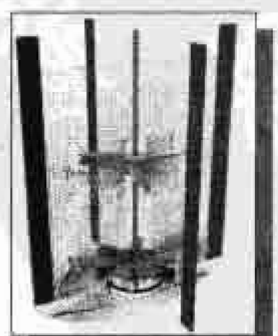
多相流的“相”是指不同的热力学集态（如固、液、气等不同物态），也可指同一集态下不同的物理性质或力学状态（如同一地点不同尺寸和速度或不同材料密度的颗粒或气泡等）。多相流的流场需用两组或两组以上流体力学和热力学参量（如速度、压强、温度、质量和组分浓度等）来描述。

多相流动广泛存在于自然界和工程设备中，如含尘埃的大气和云雾、含沙水流、各种喷雾冷却、粉末喷涂、血管流、含固体粉末的火箭尾气、炮膛内火药颗粒及其燃烧产物的流动等。就大量工程问题而言，多相流主要应用于粉粒物料的管道输送、颗粒分离和除尘、液雾和煤粉悬浮体的燃烧和气化、流化床和流化床燃烧以及锅炉、反应堆、化工、冶炼和采油等方面，其目的是节省管道输送能量，提高分离或除尘效率，改善传热传质或燃烧中颗粒混合，改善锅炉的水循环，提高反应堆冷却的安全性等。正确理解多相流动规律，才能合理利用其流场特性设计多相流装置并使用多相流实现各种目的。本讲主要介绍 FLUENT 12 中的多相流模型，主要为 VOF、Mixture 和 Euler 模型，通过 3 个实例的讲解帮助读者掌握多相流动的模拟过程。

本讲内容

- 实例·模仿——T 型管内气固两相流
- VOF 模型
- Mixture 模型
- Euler 模型
- 实例·操作——河流跌坎流动
- 实例·练习——上升管内气液两相流





6.1　实例·模仿——T 型管内气固两相流

在石油工程及环境工程领域，经常涉及气液分离的问题，目前，用于气液分离的方法有很多，包括重力沉降、折流分离、离心力分离、丝网分离、超滤分离及填料分离等，其中，最方便的一种方法就是重力沉降法，利用 T 型管来实现分离效果，如图 6-1 和图 6-2 所示。

下面针对 T 型管气固分离问题进行仿真模拟。

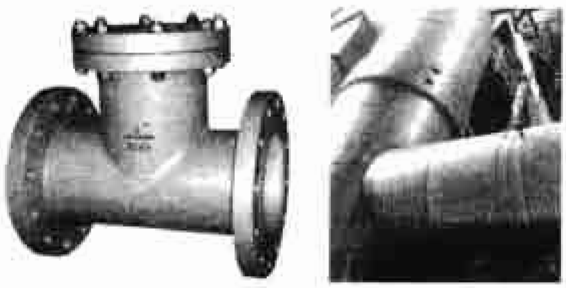


图 6-1　T 型管

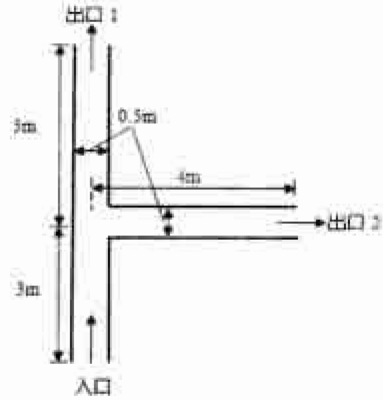


图 6-2　T 型管几何尺寸

【思路分析】

本例涉及气固两相流，可以采用欧拉多相流模型。由于是气体携带直径为 0.5mm 的固体颗粒流动，所以应将空气定义为基本相，而将固体颗粒定义为第二相。整个模拟计算流程如图 6-3 所示。



图 6-3　T 型管气固两相流模拟流程

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch6\6-1.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch6\6-1.cas，6-1.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch6\6-1.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器，如图 6-4 所示。

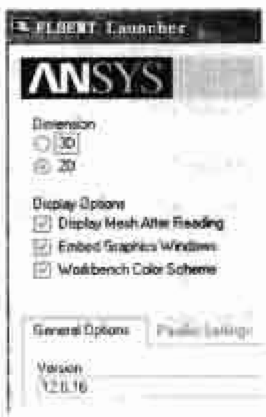


图 6-4　启动 2D 解算器

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 6-1.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，网格加载如图 6-5 所示。

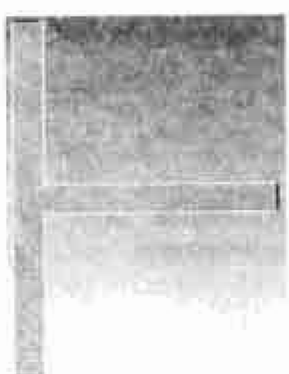


图 6-5　网格

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在打开的 General 面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，如图 6-6 所示，单击 Close 按钮关闭对话框。

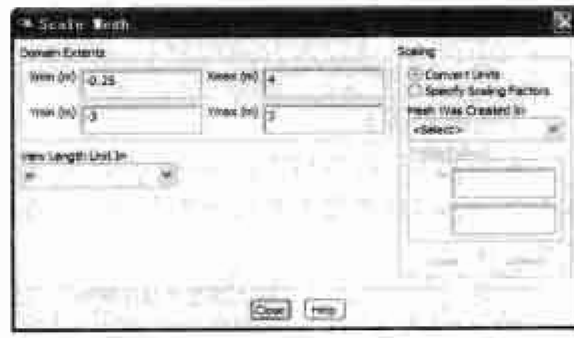


图 6-6　Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）在 General 面板的 Solver 栏中进行基本模型设置，这里保持定常模型及绝对速度选项，选中 Gravity 复选框，并设置 Y(m/s2) 为-9.8，即考虑在 Y 轴负向存在重力加速度，如图 6-7 所示。

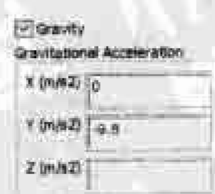


图 6-7　设置重力加速度

（6）在操作面板中选择 Problem Setup 下的 Models 选项，在打开的 Models 面板中双击 Multiphase-Off 选项，弹出如图 6-8 所示的 Multiphase Model 对话框，选中 Eulerian 单选按钮，设置 Volume Fraction Parameters 为

Implicit，并设置 Number of Eulerian Phases 为 2，单击 OK 按钮。回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框，如图 6-9 所示，选中 k-epsilon(2 eqn)单选按钮，并选择 k-epsilon Model 为 Standard，单击 OK 按钮。



图 6-8　选择欧拉模型

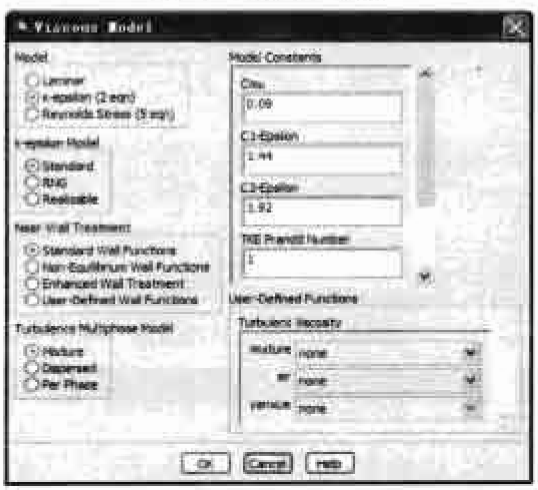


图 6-9　Viscous Model 对话框

（7）定义本例的固体颗粒材料。选择 Problem Setup 下的 Materials 选项，单击 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，单击 User-Defined Database 按钮，弹出如图 6-10 所示的 Open Database 对话框。设置 Database Name 为 New Materials，单击 OK 按钮。此时，弹出 User-Defined Database Materials 对话框，左侧列表框中尚没有自定义材料，如图 6-11 所示。保持介质类型为 fluid（欧拉模型采用的固体颗粒也必须定义成流体介质），单击 New 按钮，弹出如图 6-12 所示的 Materials Properties 对话框，设置 Name 为新材料的名字，此处输入“yanxue”，Formula 化学式可以不输入。选择 Types 为 fluid，并从 Available Properties 列表框中选择 Cp(Specific Heat)、Density、Thermal Conductivity、Viscosity 4 个参数到右侧 Material Properties 列表框中，如图 6-13 所示。然后选择 Cp(Specific Heat)选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 6-14 所示的对话框，选择比热容为常数，并在最下端的数据输入框中输入“1100”，单击 OK 按钮。采用同样的方法定义密度、导热系数和粘度 3 个参数为常数，定义对话框如图 6-15~图 6-17 所示。回到 Materials Properties 对话框，依次单击 Apply 按钮和 Close 按钮，即可看到 User-Defined Database Materials 对话框中已经存在新材料——yanxue，如图 6-18 所示，单击 Copy 按钮，把自定义材料数据库中的 yanxue 调入到当前工程中来，单击 Close 按钮，关闭 Create/Edit Materials 对话框，完成材料定义设置。



图 6-10　Open Database 对话框

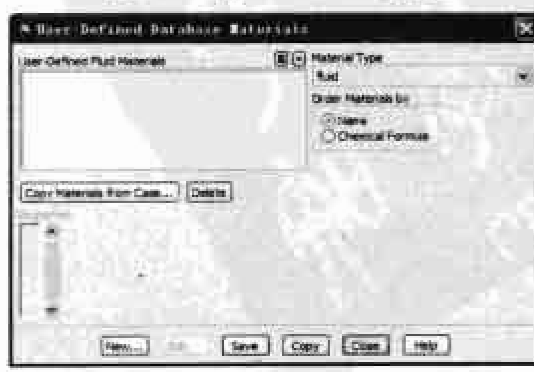


图 6-11　User-Defined Database Materials 对话框

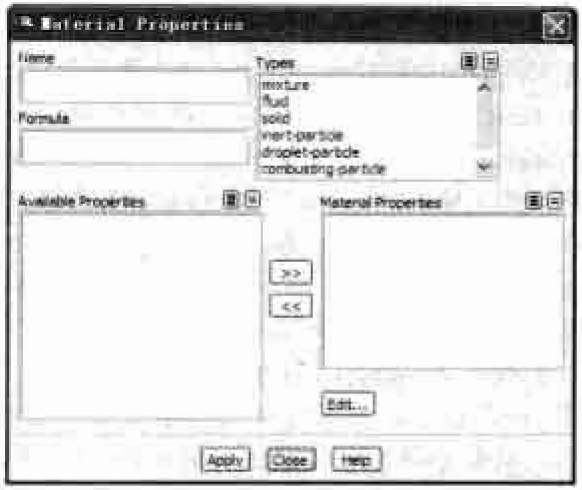


图 6-12 Materials Properties 对话框

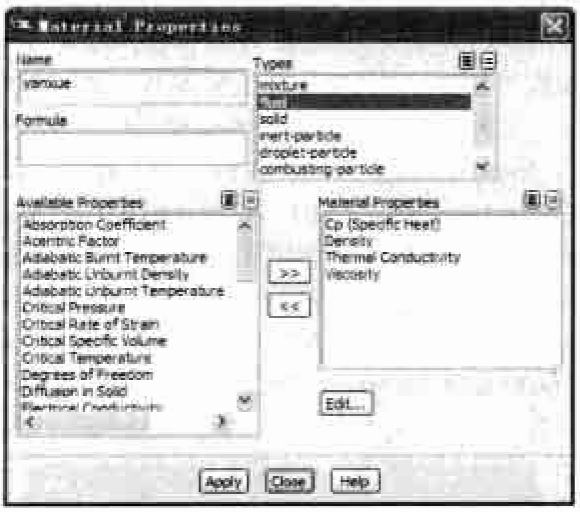


图 6-13 选择要定义的物性参数

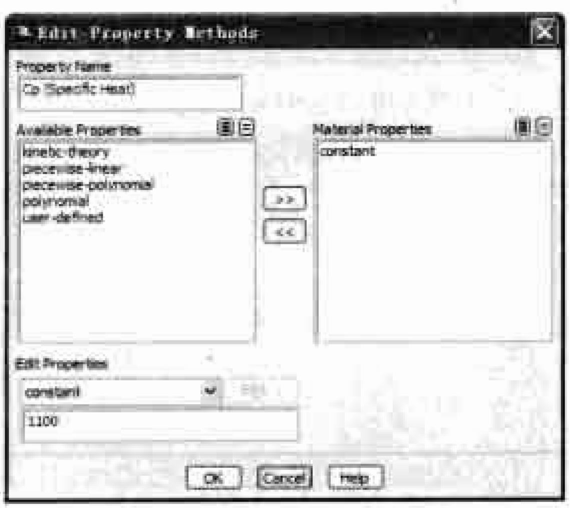


图 6-14 定义比热容

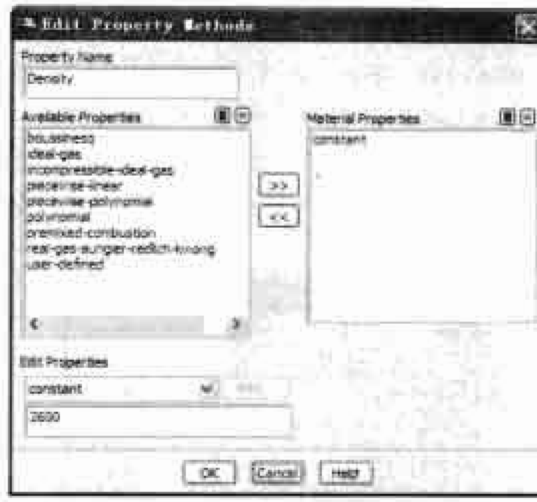


图 6-15 定义密度



图 6-16 定义导热系数

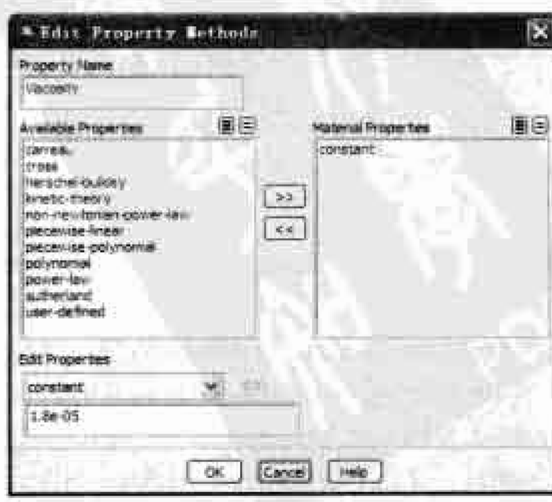


图 6-17 定义粘度

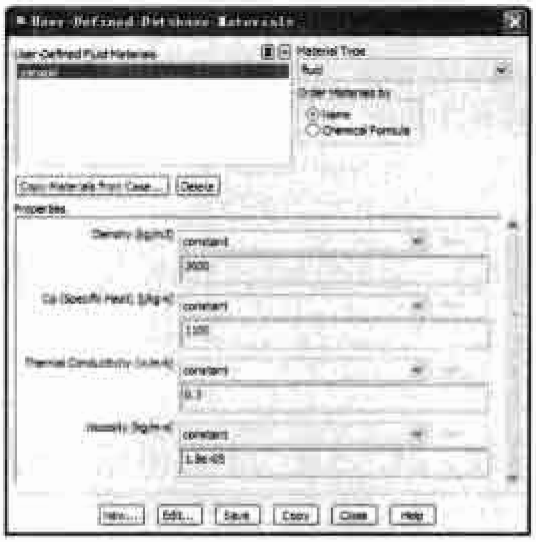


图 6-18 定义好的材料

（8）选择 Problem Setup 下的 Phases 选项，双击 Phases 面板中的 Phase-Primary Phase 选项，弹出如图 6-19 所示的 Primary Phase 对话框，改变 Name 为 air，并选择 Phase Material（第一相材料）为 air，单击 OK 按钮。回到 Phases 面板，双击 Phase-Secondary Phase 选项，弹出如图 6-20 所示的 Secondary Phase 对话框，改变 Name 为 yanxue，并选择 Phase Material（第二相材料）为 yanxue（岩屑），设置其颗粒直径为 0.0005m，单击 OK 按钮。



图 6-19 第一相设置

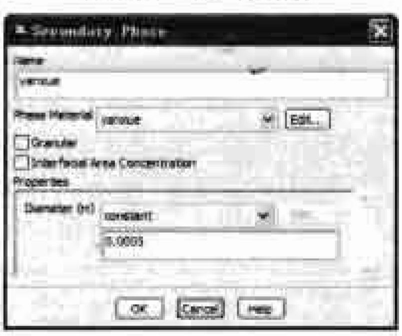


图 6-20 第二相设置

（9）选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，在 Boundary Conditions 面板中选择 in 选项，如图 6-21 所示，保持 Phase 下拉列表框中选择 mixture 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，如图 6-22 所示，选择 Turbulence 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity (%)为 5、Hydraulic Diameter(m)为 0.5，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，仍选择 in 选项，改变 Phase 下拉列表框中的选项为 air，单击 Edit 按钮，再次弹出 Velocity Inlet 对话框，如图 6-23 所示，设置 Velocity Magnitude(m/s)为 6，单击 OK 按钮。再回到 Boundary Conditions 面板，仍选择 in 选项，改变 Phase 下拉列表框中的选项为 yanxue，单击 Edit 按钮，在弹出的 Velocity Inlet 对话框中设置速度为 5，如图 6-24 所示，并选择 Multiphase 选项卡，如图 6-25 所示，设置 Volume Fraction 为 0.01，单击 OK 按钮。入口边界定义完后，选择 out1 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 6-26 所示的 Outflow 对话框，设置 Flow Rate Weighting 为 0.38，单击 OK 按钮。用同样的方法设置另一个出口的 Flow Rate Weighting 为 0.62。

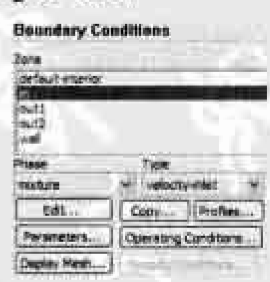


图 6-21 边界设置面板

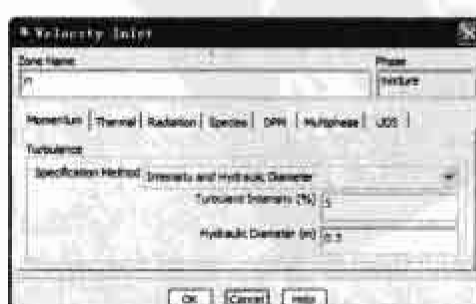


图 6-22 Velocity Inlet 对话框

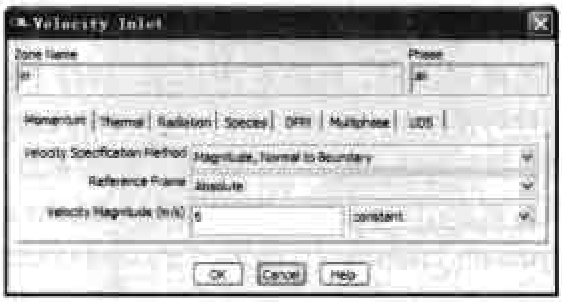


图 6-23　入口气体速度设置

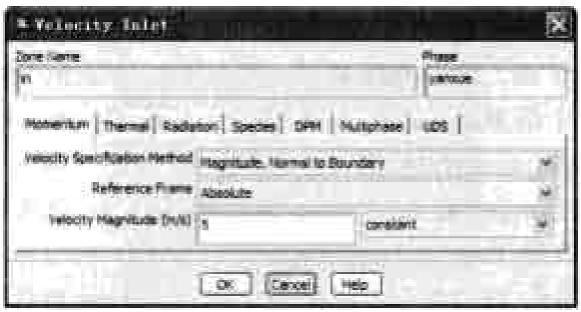


图 6-24　入口岩屑速度设置

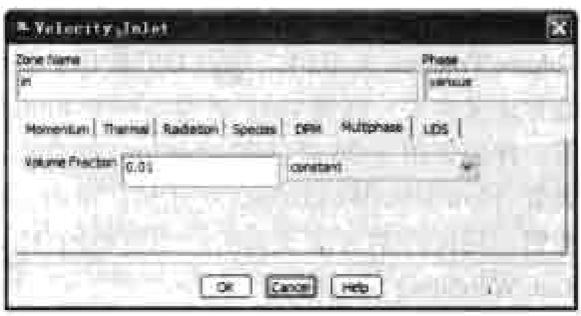


图 6-25　入口岩屑浓度设置



图 6-26　出口 1 设置

（10）边界定义完后，选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，这里保持默认的算法设置，如图 6-27 所示。

（11）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，设置 Volume Fraction 的松弛因子为 0.5、Pressure 和 Momentum 的松弛因子分别为 0.3 和 0.7、Turbulent Kinetic Energy 和 Turbulent Dissipation Rate 均为 0.8，其余各项均为 1，如图 6-28 所示。

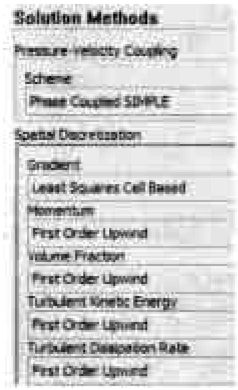


图 6-27　算法设置

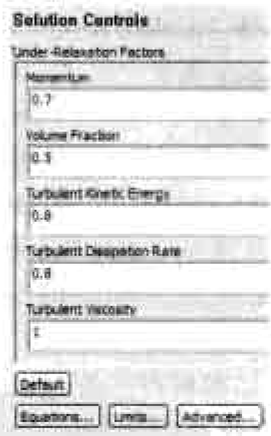


图 6-28　松弛因子

（12）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在展开的面板中选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 6-29 所示的对话框，设置所有项的收敛精度均为 0.001，单击 OK 按钮。

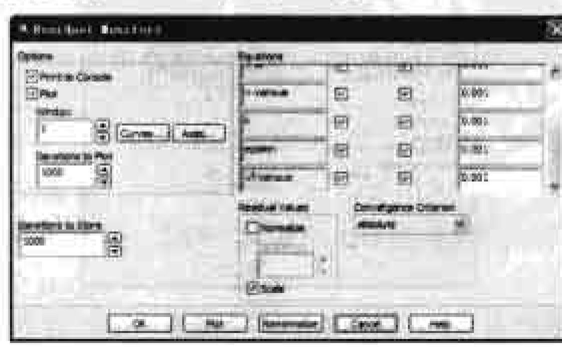


图 6-29　收敛精度设置

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Initialization 选项，选择展开面板中的 Compute from 为 in，如图 6-30 所示，单击 Initialize 按钮，完成初始化。

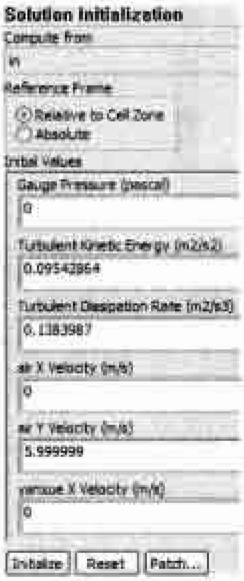


图 6-30　初始化

（14）选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 6-31 所示的面板中设置 Number of Iterations 为 2000，单击 Calculate 按钮开始计算。计算结束后的残差曲线如图 6-32 所示。

（15）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的面板中双击 Contours 选项，弹出如图 6-33 所示的 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Velocity...和 Velocity Magnitude 选项，并设置 Phase 为 air，单击 Display 按钮，可得到如图 6-34 所示的空气速度云图。若改变 Phase 为 yanxue，单击 Display 按钮，可得到如图 6-35 所示的岩屑速度云图。重新在 Contours of 栏中选择 Phase...和 Volume Fraction 选项，并设置 Phase 为 air，单击 Display 按钮，可得到如图 6-36 所示的空气体积分数云图。改变 Phase 为 yanxue，可得到如图 6-37 所示的岩屑体积分数云图。

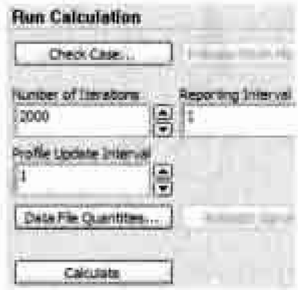


图 6-31　迭代设置

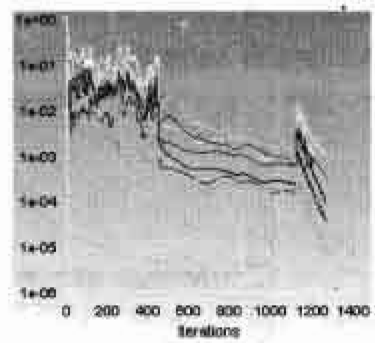


图 6-32　残差曲线

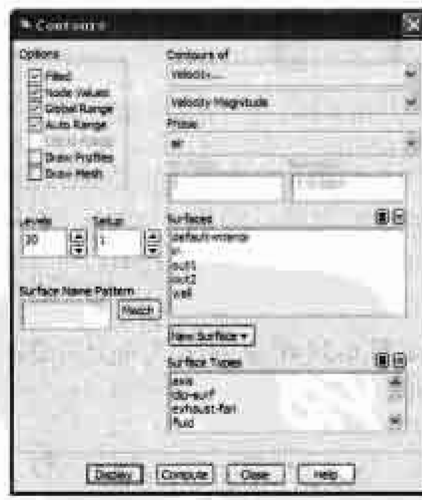


图 6-33　Contours 对话框

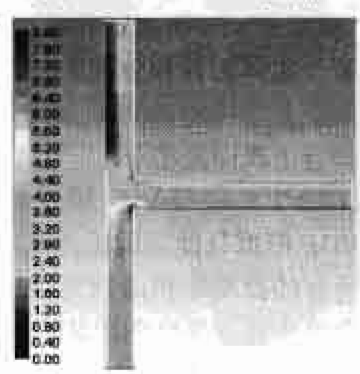


图 6-34　空气速度云图

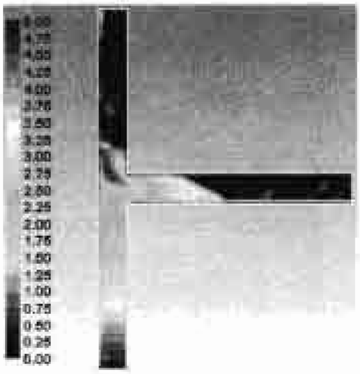


图 6-35　岩屑速度云图

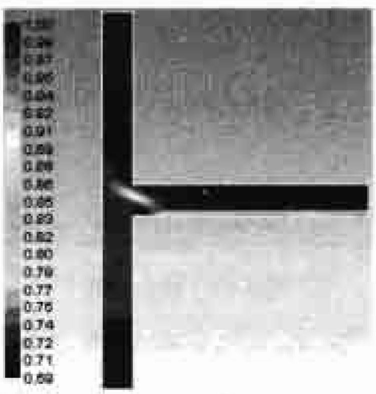


图 6-36　空气体积分数云图

（16）双击 Graphics and Animations 面板中的 Vectors 选项，弹出 Vectors 对话框，设置 Vectors of 为 Velocity、Phase 为 air、矢量箭头尺寸（Scale）为 2，单击 Display 按钮，可得到如图 6-38 所示的空气速度矢量图。

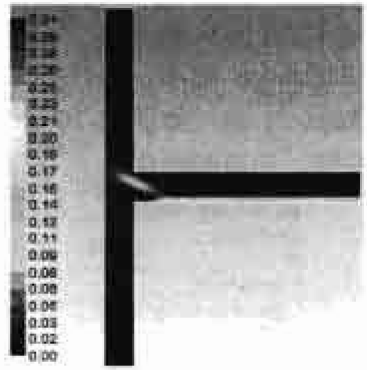


图 6-37　岩屑体积分数云图

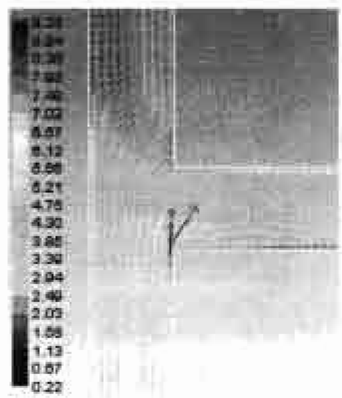


图 6-38　空气速度矢量图

（17）图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（6-1.cas 和 6-1.dat）。

（18）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

6.2　VOF 模型

VOF 模型是一种在固定的欧拉网格下的表面跟踪方法，通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的体积分数来模拟两种或 3 种不能混合的流体。当需要得到一种或多种互不相融流体间的交界面时，可以采用这种模型。其典型的应用包括分层流、射流破碎、流体中的大泡运动和自由表面流动等。

在 FLUENT 中使用 VOF 模型具有如下限制：

- VOF 模型只能采用压力基求解器。
- 所有的控制体积必须充满单一流体相或者相的联合，VOF 模型不允许在那些空的区域中没有任何类型的流体存在。
- VOF 模型中只有一相允许被定义为可压缩理想气体，但是不限制使用 UDF 定义可压缩液体相。

- ◆ 周期性流动问题不能和 VOF 模型同时计算。
- ◆ 二阶隐式的时间格式不能用于 VOF 模型。
- ◆ 组分混合和反应流动问题不能和 VOF 模型同时计算。
- ◆ 大涡模拟湍流模型不能用于 VOF 模型。
- ◆ VOF 模型不能用于并行计算中追踪粒子。
- ◆ 无粘流动不能使用 VOF 模型。
- ◆ 壁面壳传导模型不能和 VOF 模型同时计算。

另外，VOF 模型通常用于计算时间依赖解，即瞬态问题。但是对于只关心稳态解的问题，如求解不依赖初始条件并且各相有明显的流入边界的问题，它可以执行稳态计算。例如，槽道顶部有空气的水的流动与分离的空气入口可以采用稳态公式计算，而旋转杯子中的自由表面形状依赖流体的初始水平，就必须采用非定常计算。

在 FLUENT 中，选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，在打开的 Models 面板中双击列表框中的 Multiphase-Off 选项，弹出如图 6-39 所示的 Multiphase Model 对话框，FLUENT 默认选项为 Off，即不启动多相流计算，除 Off 外，还有 Volume of Fluid、Mixture 和 Eulerian 3 个选项，分别对应 VOF、Mixture 和 Eulerian 模型。

当选中 Volume of Fluid 单选按钮时，即启用了 VOF 模型，如图 6-40 所示。其中在 Volume Fraction Parameters 栏中，Scheme 可选择显式（Explicit）和隐式（Implicit）格式。当选择显式时，需要输入适当的 Courant 数，FLUENT 默认值为 0.25。在 Number of Eulerian Phases 微调框中可以指定多相流模型计算的相数，最多为 20 相。选中 Open Channel Flow 复选框表示问题为明渠流（即包含自由液面）。涉及体积力计算时，还需要选中 Implicit Body Force 复选框，以通过解决压力梯度和动量方程中体积力的部分平衡加快解的收敛。



图 6-39　Multiphase Model 对话框

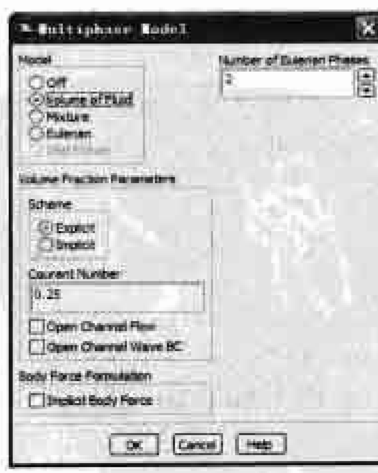


图 6-40　启动 VOF 模型

6.3　Mixture 模型

混合模型（Mixture 模型）是一种简化的多相流模型，可用于模拟两相或多相具有不同速度

的流动（流体或颗粒）。混合模型主要实现求解混合相的连续性方程、动量方程、能量方程、第二相的体积分数及相对速度方程的功能。典型的应用包括低质量载荷的粒子负载流、气泡流、沉降以及旋风分离器等。混合模型也可用于没有离散相相对速度的均匀多相流。

在 FLUENT 中使用 Mixture 模型具有如下限制：

- 混合模型只能用于压力基求解器。
- 只有一相允许被定义为可压缩理想气体，但是不限制使用 UDF 定义可压缩液体相。
- 不能用于求解周期性流动。
- 不能用于模拟凝固和融化过程。
- 无粘流动不能使用 Mixture 模型。
- 在模拟气穴现象时，若湍流模型为 LES 模拟，则不能使用 Mixture 模型。
- 在 MRF 多旋转坐标系与混合模型同时使用时，不能使用相对速度公式。
- 不能和固体壁面的热传导模拟同时使用。
- 不能用于并行计算和颗粒轨道模型。
- 组分混合和反应流动问题不能和混合模型同时计算。
- 二阶隐式时间步算法不能采用混合模型。

混合模型和 VOF 模型的相同之处在于它们都是一种“单流体”模型，即只求解一套动量、能量方程，具体如下：

- 混合模型允许相间穿插，即在同一控制体内各相体积分数可以是 0~1 之间的任意数，总和为 1。
- 相间允许有速度滑移。

在 Multiphase Model 对话框中选中 Mixture 单选按钮，即启动了混合模型，如图 6-41 所示。其中，Mixture Parameters 栏中的 Slip Velocity 为滑移速度，若选中该复选框则考虑相间滑移，若取消选中该复选框则表示相间速度一致。Number of Eulerian Phases 和 Implicit Body Force 与 VOF 模型设置一致。

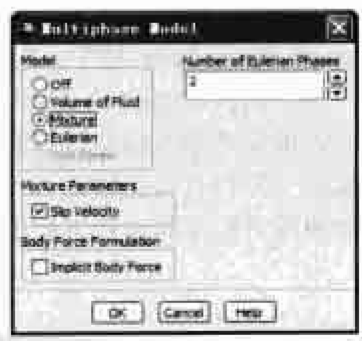


图 6-41　选择 Mixture 模型

6.4　Euler 模型

欧拉 Euler 模型可以模拟多相流动及相间的相互作用。相可以是气体、液体、固体的任意组合。每一相都采用 Eulerian 处理。采用欧拉模型时，第二相的数量仅因为内存要求和收敛行为而受到限制，只要有足够的内存，任意多个第二相都可以模拟。然而，对于复杂的多相流流动，解会受到收敛性的限制。欧拉多相流模型没有液-液、液-固的差别，其颗粒流是一种简单的流动，定义时至少涉及有一相被指定为颗粒相。

在 FLUENT 中使用 Euler 模型具有如下限制：

- 不能对各相使用雷诺应力湍流模型。
- 不能用于求解周期性流动。
- 不能用于模拟凝固和融化过程。
- 无粘流动不能使用 Euler 模型。

- 不能用于并行计算中和颗粒轨道模型。
- 不允许存在压缩流动。
- 颗粒跟踪仅与主相相互作用。
- 模型中不能考虑热传输。
- 相间的质量传输仅允许在气穴问题中，而在蒸发和压缩中是不可行的。
- 二阶隐式时间步算法不能采用 Euler 模型。

FLUENT 的 Euler 模型中各相共享单一的压力场，对每一相都求解动量和连续性方程。颗粒相才可以根据颗粒动力学理论计算颗粒拟温度、粒子相剪切和体积粘性、摩擦粘性。

在 Multiphase Model 对话框中选中 Eulerian 单选按钮，即启动欧拉模型，如图 6-42 所示。其中，Eulerian Parameters 栏中的 Dense Discrete Phase Model 和 Immiscible Fluid Model 分别供稠密离散相和不混溶流体计算时选用，Number of Eulerian Phases 和 Volume Fraction Parameters 与 VOF 模型设置一致。

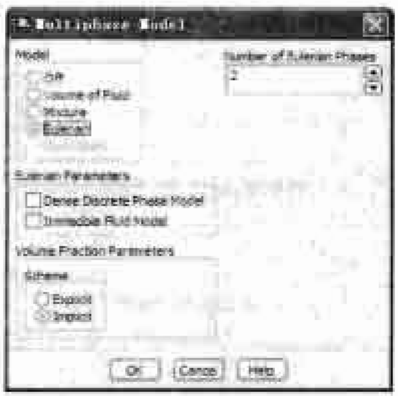


图 6-42　选择 Euler 模型

6.5　实例・操作——河流跌坎流动

在河水由高到低的流动过程中经常会遇到跌坎，突然的落差势必改变了原先的流动状态，造成涡流、飞溅和气雾等现象，如图 6-43 所示。那么，河流跌坎处的流场分布究竟有多大的变化呢？下面就对二维河流跌坎的流动情况进行模拟分析，其具体尺寸如图 6-44 所示。



图 6-43　河流跌坎

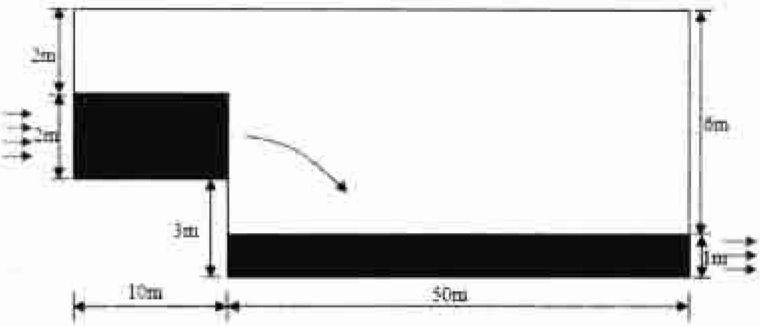


图 6-44　计算区域尺寸

【思路分析】

由于本例涉及气液两相流，且液体的流动界面时刻发生着变化，故应选用 VOF 模型。由于计算区域中气体占据的空间较多，这里可将空气定义为基本相，而将水定义为第二相。本例初始状态的水流分布在图 6-44 中的深色区域，随着时间的推移，上游的水流经过跌坎流入下游，故该问题为非定常流动，需要启用非定常模型。另外，在初始化时，需要对水域进行补充设置，以实现图 6-44 所示的水流分布初始状态。整个模拟计算的流程如图 6-45 所示。

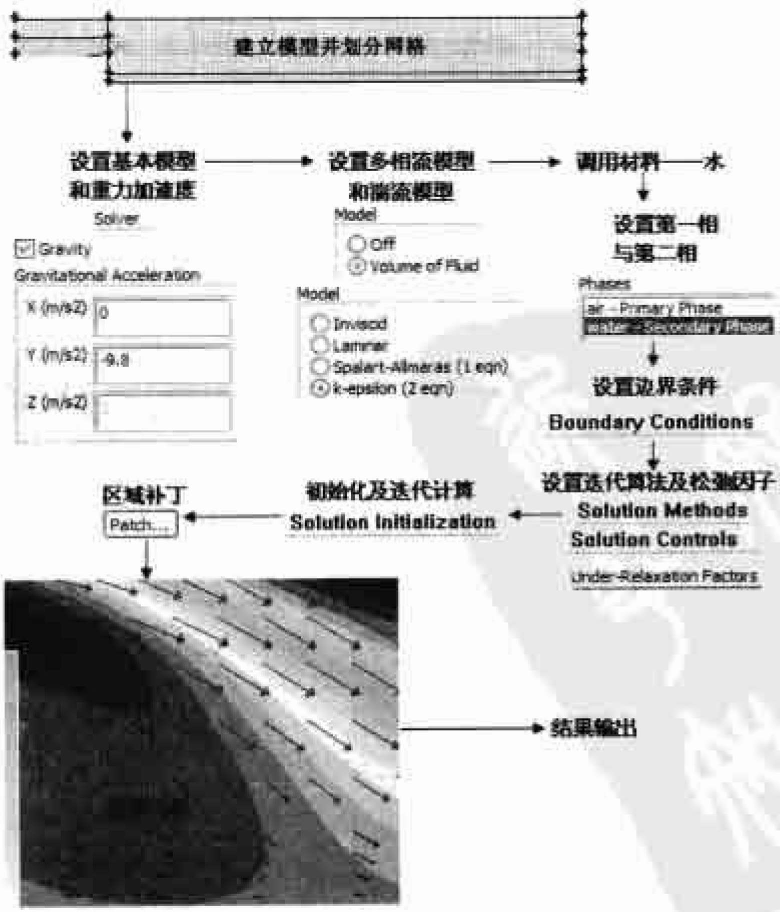


图 6-45　河流跌坎流动模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch6\6-5.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch6\6-5.cas，6-5.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch6\6-5.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器，如图 6-46 所示。

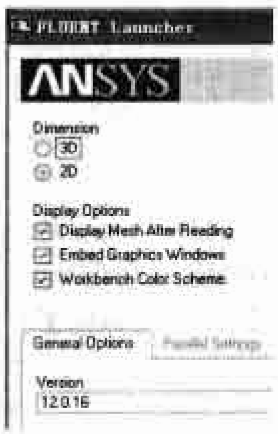


图 6-46　启动 2D 解算器

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 6-5.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，网格加载如图 6-47 所示。



图 6-47　网格

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在打开的 General 面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，如图 6-48 所示，单击 Close 按钮关闭对话框。

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）在 General 面板的 Solver 栏中进行基本模型设置，这里保持定常模型及绝对速度选项，选中 Gravity 复选框，并设置 Y(m/s2) 为−9.8，即考虑在 *Y* 轴负向存在重力加速度，如图 6-49 所示。

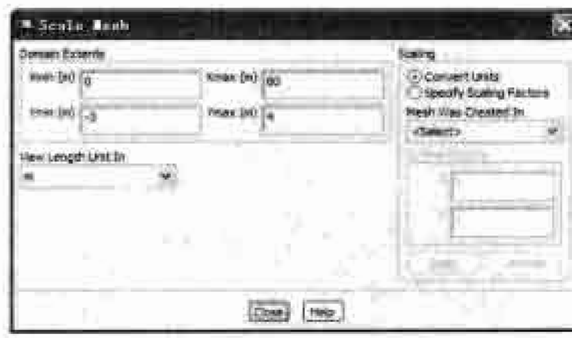


图 6-48　Scale Mesh 对话框

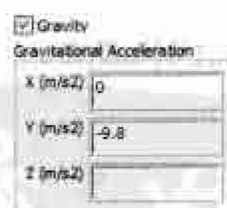


图 6-49　设置重力加速度

（6）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，在展开的面板中双击 Multiphase-Off 选项，弹出如图 6-50 所示的 Multiphase Model 对话框，选中 Volume of Fluid 单选按钮，设置 Volume Fraction Parameters 为 Implicit，并选中 Open Channel Flow 复选框，设置 Number of Eulerian Phases 为 2，单击 OK 按钮。回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框，如图 6-51 所示，选中 k-epsilon(2 eqn)单选按钮，并选择 k-epsilon Model 为 Standard，单击 OK 按钮。



图 6-50　Multiphase Model 对话框

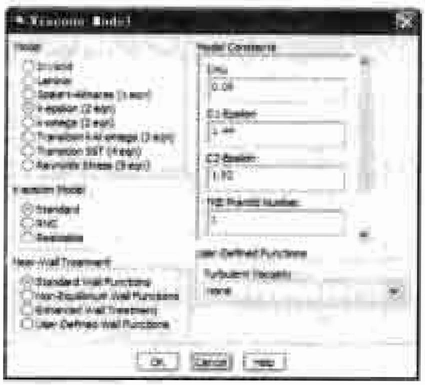


图 6-51　Viscous Model 对话框

（7）选择 Problem Setup 下的 Materials 选项，单击 Materials 面板中的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，然后单击 FLUENT Database 按钮，弹出 FLUENT Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表框中的 water-liquid 选项，单击 Copy 按钮，即将 FLUENT 自带材料数据库中的水调用到当前工程中。回到 Create/Edit Materials 对话框，即可看到流体材料下拉列表框中已经有水。单击 Close 按钮，关闭 Create/Edit Materials 对话框。

（8）选择 Problem Setup 下的 Phases 选项，双击 Phases 面板中的 Phase-Primary Phase 选项，弹出如图 6-52 所示的 Primary Phase 对话框，改变 Name 为 air，并选择 Phase Material（第一相材料）为 air，单击 OK 按钮。回到 Phases 面板，双击 Phase-Secondary Phase，弹出如图 6-53 所示的 Secondary Phase 对话框，改变 Name 为 water，并选择 Phase Material（第二相材料）为 water-liquid，单击 OK 按钮。



图 6-52　第一相设置



图 6-53　第二相设置

（9）定义本例的边界条件。选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions，在打开的面板中选择 in 选项，保持 Phase 下拉列表框中选择 mixture，单击 Edit 按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，如图 6-54 所示，设置 Velocity Magnitude (m/s)为 5，选择 Turbulence 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity (%)为 5、Hydraulic Diameter(m)为 2，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，仍选择 in 选项，改变 Phase 中的选项为 water，单击 Edit 按钮，再次弹出 Velocity Inlet 对话框，如图 6-55 所示，选择 Multiphase 选项卡，设置 Volume Fraction 为 1，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，选择 p-in 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Pressure Inlet 对话框，如图 6-56 所示，保持总压为 0，选择 Turbulence 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity(%)为 1、Hydraulic Diameter (m)为 68，单击 OK 按钮。入口边界定义完后，选择 out 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 6-57 所示的 Pressure Outlet 对话框，保持总压为 0，选择同样的 Turbulence 的方式，设置 Backflow Turbulent Intensity(%)为 5、Backflow Hydraulic Diameter(m)为 1，单击 OK 按钮。

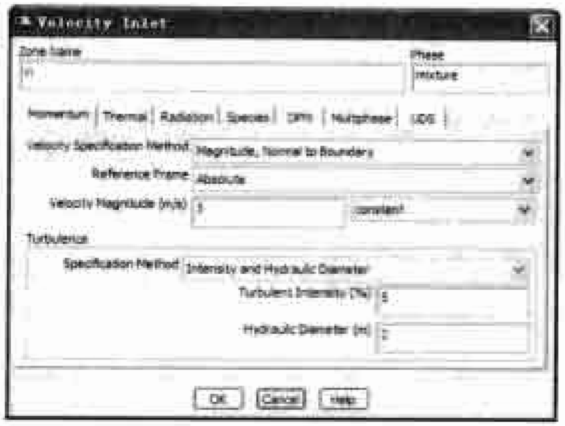


图 6-54　Velocity Inlet 对话框

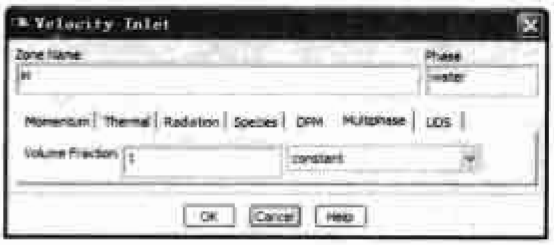
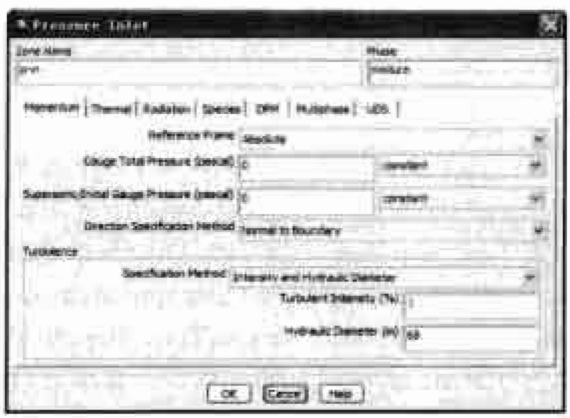


图 6-55　入口水的体积分数设置



.图 6-56　Pressure Inlet 对话框

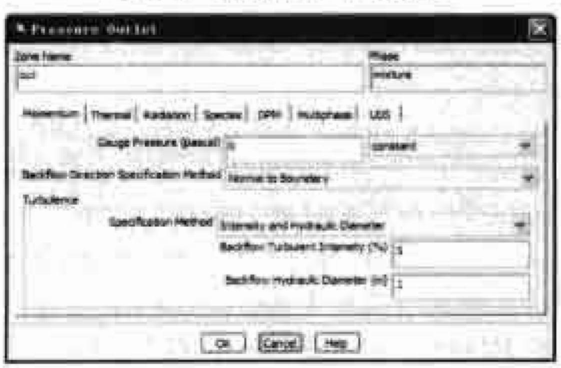


图 6-57　Pressure Outlet 对话框

（10）边界定义完后，选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，这里保持默认的算法设置，如图 6-58 所示。

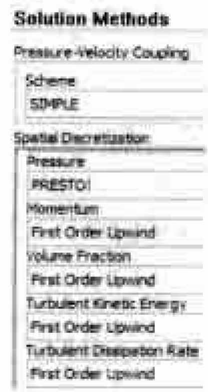


图 6-58　算法设置

（11）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，设置 Volume Fraction 的松弛因子为 0.5、Pressure 和 Momentum 的松弛因子分别为 0.3 和 0.7、Turbulent Kinetic Energy 和 Turbulent Dissipation Rate 均为 0.8，其余各项为 1，如图 6-59 所示。

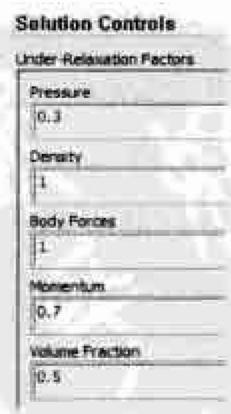


图 6-59　松弛因子设置

（12）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在打开的面板中选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 6-60 所示的对话框，保持默认设置，单击 OK 按钮。

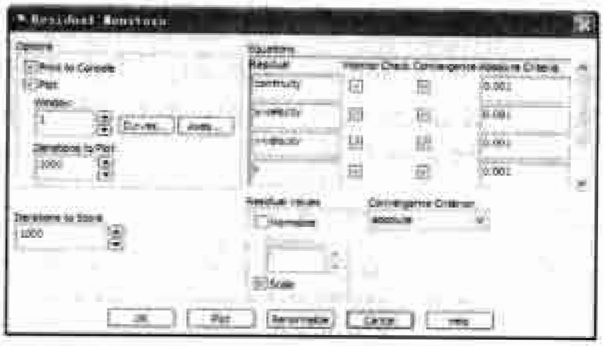


图 6-60　收敛精度设置

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Initialization 选项，选择展开面板中的 Compute from 为 in，如图 6-61 所示，单击 Initialize 按钮，完成初始化。

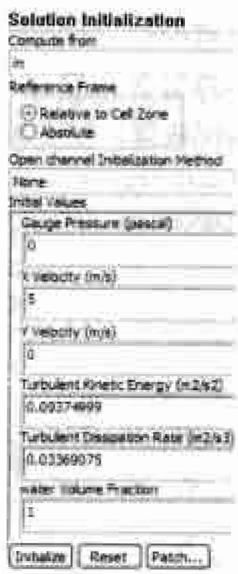


图 6-61　初始化

（14）初始化完后，需要进行区域补充设置。单击 Solution Initialization 面板下方的 Patch 按钮，弹出如图 6-62 所示的 Patch 对话框。首先选择 Zones to Patch 列表框中的 fluid 选项，设置 Phase 为 water，并在 Variable 列表框中选择 Volume Fraction 选项，设置 Value 为 0，即将整个计算区域都定义为空气。然后选择 Zones to Patch 列表框中的 f1、f2 选项，仍设置 Phase 为 water，并在 Variable 列表框中选择 Volume Fraction 选项，这时设置 Value 为 1，如图 6-63 所示，即将这两个计算区域都定义为水。

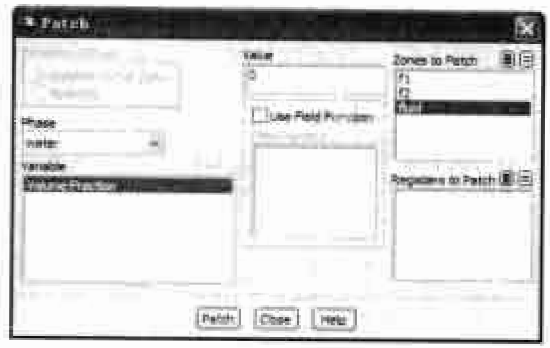


图 6-62　Patch 对话框

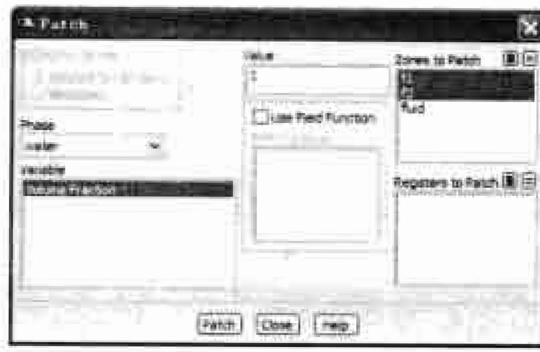


图 6-63　定义水的初始区域

（15）选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 6-64 所示的面板中设置 Time Step Size (s)为 0.05、Number of Time Steps 为 300，选择 Time Stepping Method 为 Fixed，并设置 Max Iterations/Time Step 为 30，单击 Calculate 按钮开始计算。计算结束后的残差曲线如图 6-65 所示。

（16）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的面板中双击 Contours 选项，弹出 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Phases... 和 Volume fraction 选项，并选择 Phase 为 air，单击 Display 按钮，可得到如图 6-66 所示的空气体积分数云图。改变 Phase 为 water，可得到如图 6-67 所示的水的体积分数云图。

（17）图形分析完后，选择 File→Write→

Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（6-5.cas 和 6-5.dat）。

（18）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

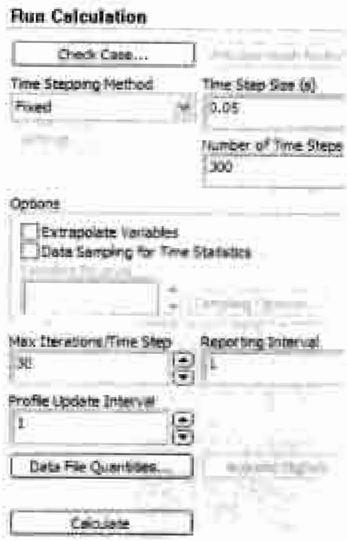


图 6-64　迭代设置

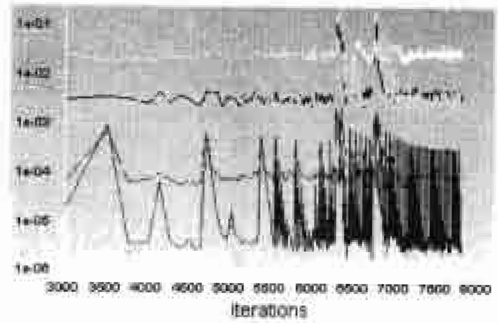


图 6-65　残差曲线



图 6-66　空气体积分数云图

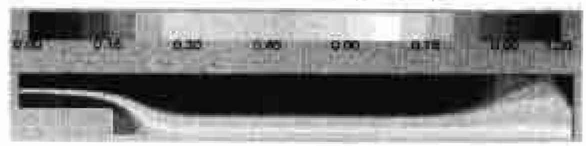


图 6-67　水的体积分数云图

6.6　实例·练习——上升管内气液两相流

上升管广泛出现在石油化工、供暖通风管道中，如图 6-68 所示。流体在上升管中流动时，重力成为其主要阻力，使得流动状态较水平管复杂。下面就上升管内的气液两相流进行模拟分析，具体上升管尺寸如图 6-69 所示。

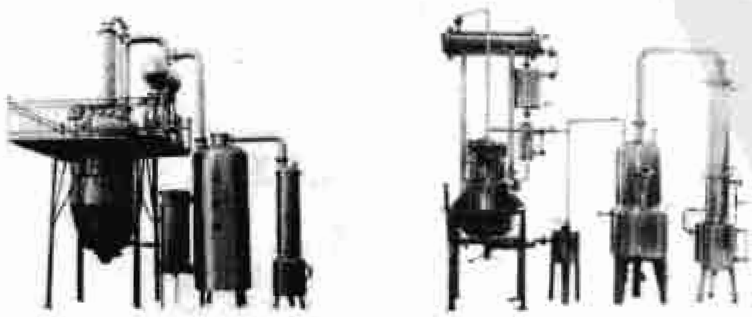


图 6-68　上升管

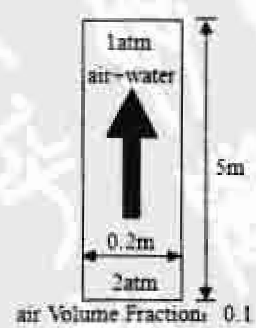


图 6-69　上升管尺寸

【思路分析】

本例与实例·操作相似，也涉及气液两相流，所以选用 VOF 模型，且启用非定常模型。管道的进出口分别定义为压力入口和压力出口，整个模拟计算的流程如图 6-70 所示。

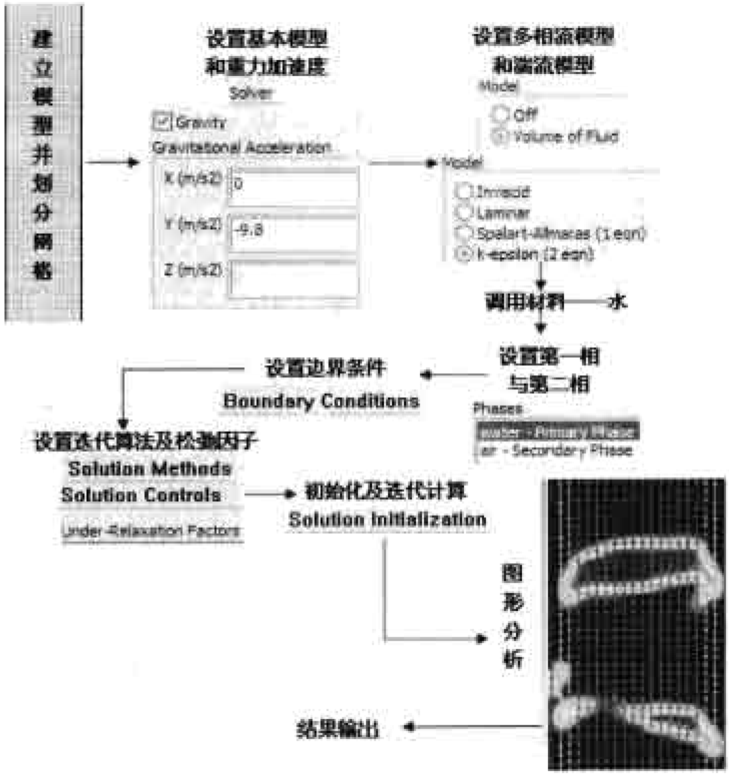


图 6-70 上升管内气液两相流模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch6\6-6.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch6\6-6.cas，6-6.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch6\6-6.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器，如图 6-71 所示。

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 6-6.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，网格加载如图 6-72 所示。

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在展开的 General 面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，用户可从中查看模型的尺寸，如图 6-73 所示，单击 Close 按钮关闭对话框。

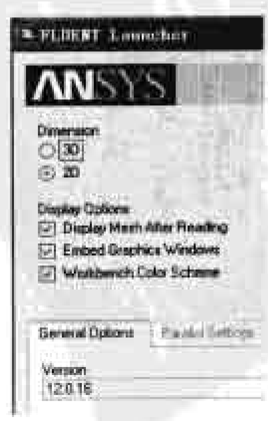


图 6-71 启动 2D 解算器



图 6-72 网格

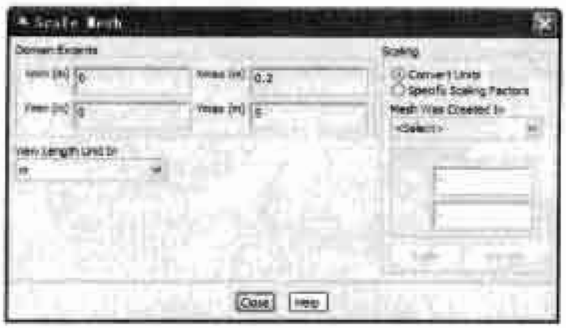


图 6-73 Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）在 General 面板的 Solver 栏下方选中 Gravity 复选框，并设置 Y(m/s2)为-9.8，即考虑在 *Y* 轴负向存在重力加速度，如图 6-74 所示。

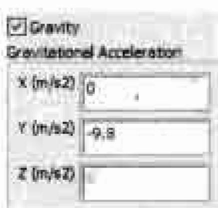


图 6-74 设置重力加速度

（6）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，在展开的 Models 面板中双击 Multiphase-Off 选项，弹出如图 6-75 所示的 Multiphase Model 对话框，选中 Volume of Fluid 单选按钮，设置 Volume Fraction Parameters 为 Explicit，并设置 Number of Eulerian Phases 为 2，单击 OK 按钮。回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框，选择 k-epsilon(2 eqn)单选按钮，并选中 k-epsilon Model 为 Standard，单击 OK 按钮。

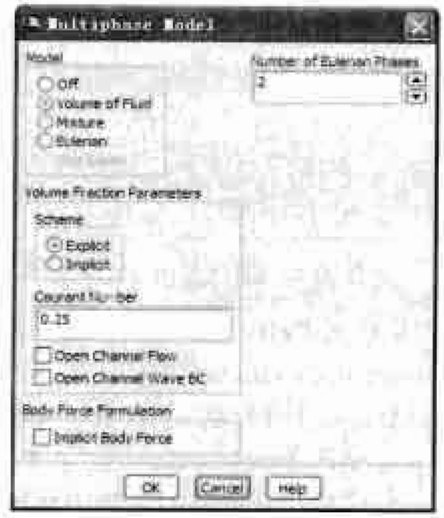


图 6-75 Multiphase Model 对话框

（7）选择 Problem Setup 下的 Materials 选项，单击 Materials 面板中的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，然后单击 FLUENT Database 按钮，弹出 FLUENT Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表框中的 water-liquid 选项，单击 Copy 按钮，即将 FLUENT 自带材料数据库中的水调用到当前工程中。回到 Create/Edit Materials 对话框，即可看到流体材料下拉列表框中已经有水。单击 Close 按钮，关闭 Create/Edit Materials 对话框。

（8）选择 Problem Setup 下的 Phases 选项，双击 Phases 面板中的 Phase-Primary Phase 选项，弹出如图 6-76 所示的 Primary Phase 对话框，改变 Name 为 water，并选择 Phase Material（第一相材料）为 water-liquid，单击 OK 按钮。回到 Phases 面板，双击 Phase-Secondary Phase 选项，弹出如图 6-77 所示的 Secondary Phase 对话框，改变 Name 为 air，并选择 Phase Material（第二相材料）为 air，单击 OK 按钮。



图 6-76　第一相设置



图 6-77　第二相设置

（9）单击 Cell Zone Conditions 面板右下角的 Operating Conditions 按钮，弹出操作环境设置对话框，这里保持默认，单击 OK 按钮。

（10）选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，在展开的面板中选择 in 选项，保持 Phase 下拉列表框中选择 mixture，单击 Edit 按钮，弹出 Pressure Inlet 对话框，如图 6-78 所示，在 Gauge Total Pressure(pascal) 数据输入框中输入“101325”，选择 Turbulence 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity(%) 为 1、Hydraulic Diameter(m) 为 0.2，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，仍选择 in 选项，改变 Phase 中的选项为 air，单击 Edit 按钮，再次弹出 Pressure Inlet 对话框，如图 6-79 所示，选择 Multiphase 选项卡，设置 Volume Fraction 为 0.1，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，选择 out 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Pressure Outlet 对话框，如图 6-80 所示，保持总压为 0，选择 Turbulence 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Backflow Turbulent Intensity(%) 为 1、Backflow Hydraulic Diameter(m) 为 0.2，单击 OK 按钮。

（11）边界定义完后，选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，这里保持默认算法设置，如图 6-81 所示。

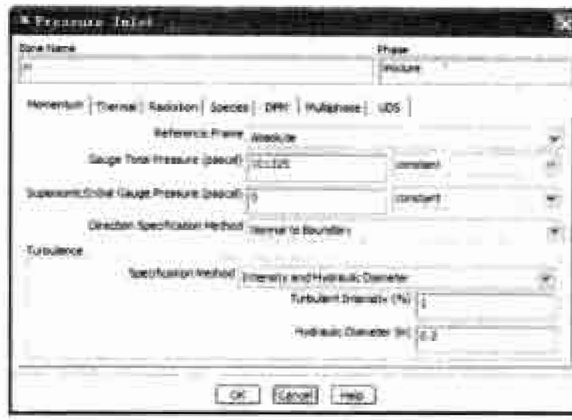


图 6-78　Pressure Inlet 对话框



图 6-79　入口空气的体积分数设置

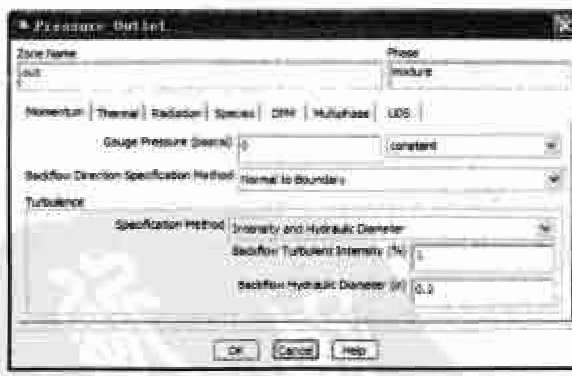


图 6-80　Pressure Outlet 对话框

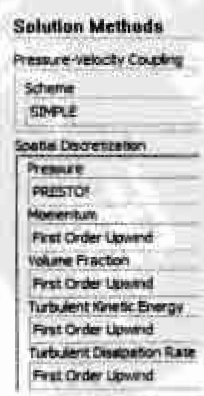


图 6-81　算法设置

（12）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置。

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在展开的面板中选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Residual Monitors 对话框，保持默认设置，单击 OK 按钮。

（14）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Initialization 选项，选择展开面板中的 Compute from 为 in，如图 6-82 所示，单击 Initialize 按钮，完成初始化。

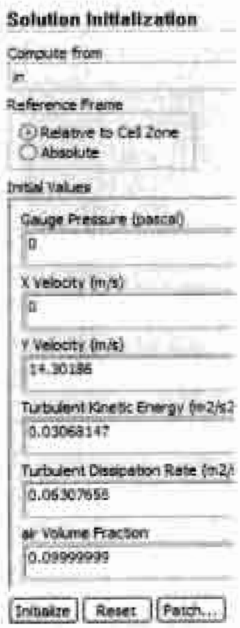


图 6-82　初始化

（15）初始化完后，选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 6-83 所示的面板中设置 Time Step Size(s)为 0.001、Number of Time Steps 为 1000，选择 Time Stepping Method 为 Variable，并设置 Max Iterations/Time Step 为 30，单击 Calculate 按钮开始计算。计算结束后的残差曲线如图 6-84 所示。

（16）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的面板中双击 Contours 选项，弹出 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Phases...和 Volume fraction 选项，并选择 Phase 为 water，单击 Display 按钮，可得到如图 6-85 所示的水的体积分数云图，按住鼠标中键框选要放大的区域，可得其局部放大图，如图 6-86 所示。若改变 Phase 为 water，可得到如图 6-87 所示的空气体积分数云图，其局部放大图如图 6-88 所示。

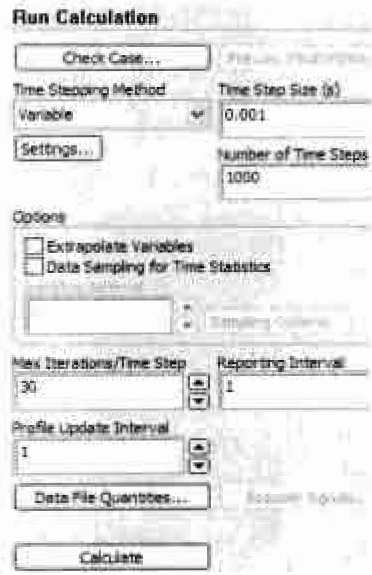


图 6-83　迭代设置

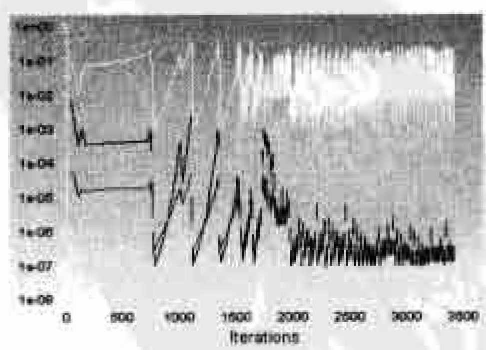


图 6-84　残差曲线

（17）图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（6-6.cas 和 6-6.dat）。

（18）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。



图 6-85　水的体积分数云图



图 6-86　水的体积分数局部放大云图

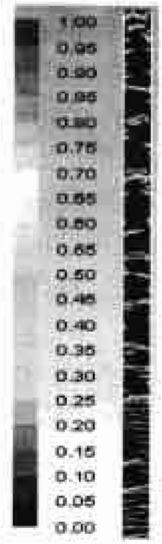


图 6-87　空气体积分数云图



图 6-88　空气体积分数局部放大云图

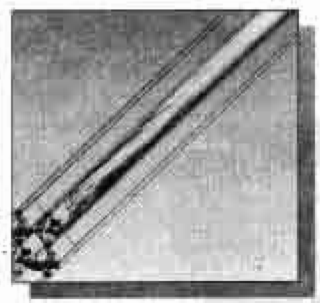
第 7 讲　离散相模型

FLUENT可以在拉格朗日坐标下模拟流场中离散的第二相，其主要以球形颗粒（如液滴、气泡等）的形式分布在连续相中。FLUENT可以计算这些颗粒的轨道以及由颗粒引起的质量和热量的传递，相间耦合以及耦合结果对离散相轨道、连续相流动的影响均可考虑进去。

应用离散相模型，可以模拟各种涉及离散相的问题，如颗粒分离与分级、喷雾干燥、气溶胶扩散过程、液体中气泡的搅浑、液体燃料的燃烧以及粉煤燃烧等。本讲针对离散相模型的计算模型、设置方法展开介绍，并通过 3 个实例阐述离散相模型的模拟过程。

本讲内容

- 实例・模仿——液固两相流冲刷腐蚀
- DPM 模型概述及应用
- 离散相轨道计算
- 传热与传质计算
- 喷雾模型
- DPM 模型初始条件设置
- DPM 模型边界条件设置
- DPM 模型介质属性设置
- 实例・操作——气动喷砂流场
- 实例・练习——水力旋流器的颗粒分离


7.1　实例・模仿——液固两相流冲刷腐蚀

液固两相流广泛存在于化工、水利、能源和建材等诸多工业领域，如河水携砂、钻井液携岩、循环流化床和泡沫排砂等，如图 7-1 所示，但液固两相流的冲刷腐蚀作用经常导致用于物流输送的泵、叶片、管道和阀门等工业过流部件发生材料的失重和损坏现象，造成材料和设备的性能下降、预期寿命缩短等问题。因此，正确认识液固两相流场对合理设计过流部件及操作参数有积极的指导作用。

由于目前冲刷磨损问题的研究主要以实验为主，并采用旋转圆盘仪这一装置来模拟叶轮在液固两相流下受到的冲刷磨损，因此，本例针对旋转圆盘仪的液固两相流场进行模拟，其具体尺寸如图 7-2 所示。

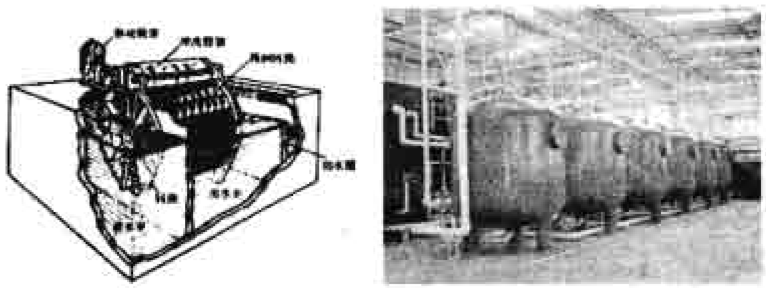


图 7-1　液固两相流

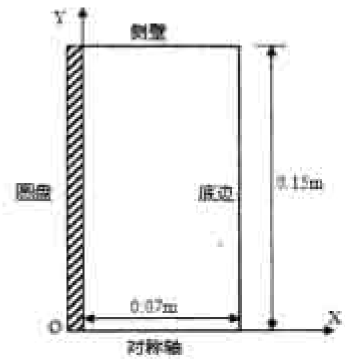


图 7-2　模型几何尺寸

【思路分析】

由于是旋转轴对称问题，故只需建立二维的一半模型，并采用对称轴边界。模拟采用 DPM 模型，定义固相颗粒初始分布在整个计算区域，随着圆盘的旋转，液固两相流开始搅浑。整个模拟流程如图 7-3 所示。

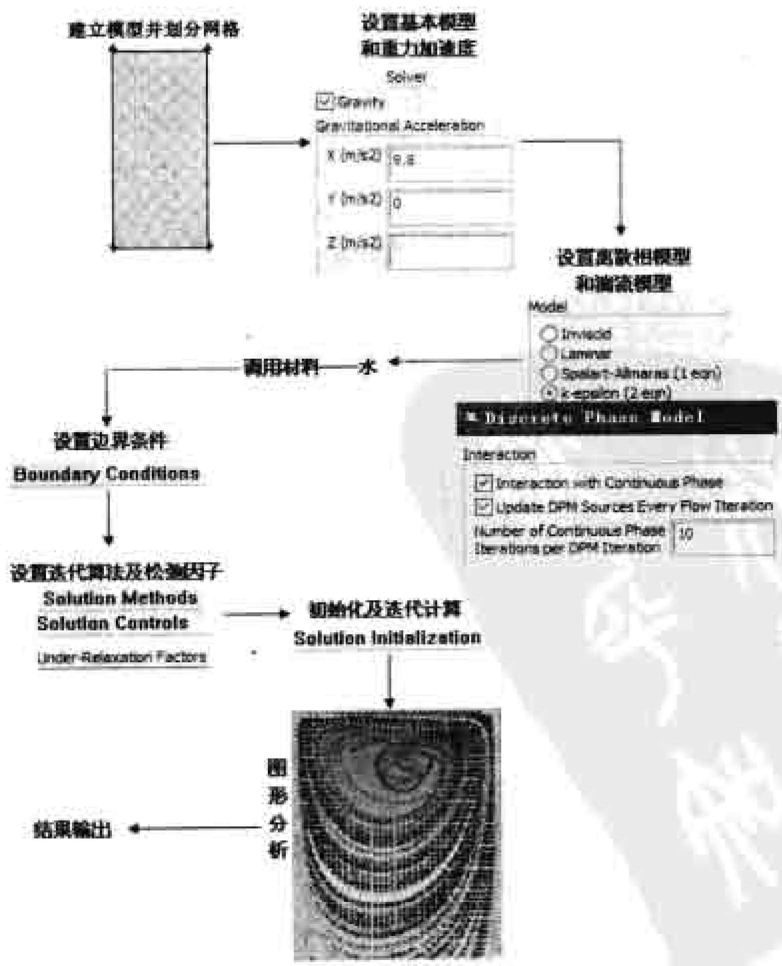


图 7-3　液固两相流冲刷腐蚀模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch7\7-1.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch7\7-1.cas，7-1.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch7\7-1.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器，如图 7-4 所示。

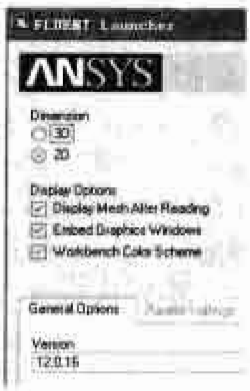


图 7-4　启动 2D 解算器

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 7-1.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，网格加载如图 7-5 所示。

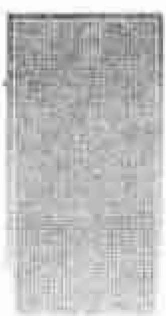


图 7-5　网格

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在展开的 General 面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，如图 7-6 所示，对话框中显示了模型的尺寸范围，这里无须改动，单击 Close 按钮，关闭对话框。

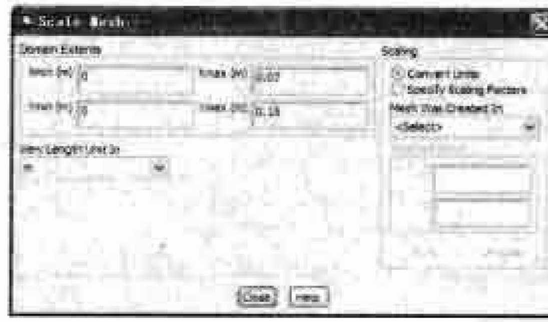


图 7-6　Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）在 General 面板的 Solver 栏进行基本模型设置，这里设置 Time 为 Transient、2D Space 为 Axisymmetric Swirl，并选中 Gravity 复选框，设置 X(m/s2)为 9.8，即在 X 轴正向存在重力加速度，如图 7-7 所示。

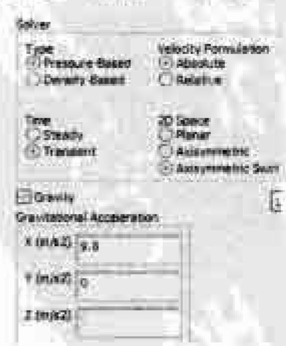


图 7-7　设置重力加速度

（6）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，在展开的面板中双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框，如图 7-8 所示，选中 k-epsilon(2 eqn)单选按钮，

并选择 k-epsilon Model 为 Standard，单击 OK 按钮。



图 7-8　Viscous Model 对话框

（7）双击 Models 面板中的 Discrete Phase-Off 选项，弹出如图 7-9 所示的 Discrete Phase Model 对话框，选中 Interaction with Continuous Phase、Update DPM Sources Every Flow Iteration 和 Unsteady Particle Tracking 复选框。然后选择 Physical Models 选项卡，选中 Options 栏中的 Erosion/Accretion 复选框，如图 7-10 所示。再在 Discrete Phase Model 对话框中选择 Numerics 选项卡，如图 7-11 所示，选中 Options 栏中的 Accuracy Control 复选框，设置 Tolerance 为 1e-05，调整 Max.Refinements 为 20，并选中 Tracing Scheme Selection 栏中的 Automated 复选框。

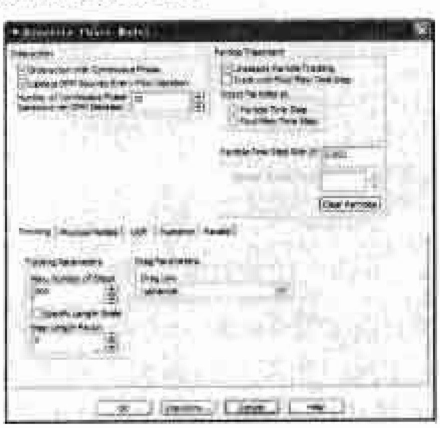


图 7-9　Discrete Phase Model 对话框

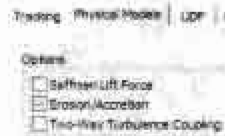


图 7-10　启用腐蚀/沉积计算



图 7-11　精度设置与跟踪轨道选择

（8）单击 Discrete Phase Model 对话框中的 Injections 按钮，弹出如图 7-12 所示的 Injections 对话框，单击 Create 按钮，弹出 Set Injection Properties 对话框，如图 7-13 所示。设置 Injection Type 为 surface（面射流源）、Release From Surfaces 为 default-interior（计算区域的整个面），Particle Type 为 Inert（惰性颗粒），在 Material 下拉列表框中选择颗粒材料为 sulfur-solid，在 Diameter Distribution（颗粒分布）下拉列表框中选择 Uniform 选项。然后选择 Point Properties 选项卡，选中 Scale Flow Rate by Face Area 复选框，并设置 Diameter(m) 为 6e-05（表示颗粒粒径为 0.06mm）、Total Flow Rate (kg/s)为 0.02，单击 OK 按钮。回到 Injections 对话框，在 Injections 列表框中即可看到已定义好的射流源，单击 Close 按钮。回到 Discrete Phase Model 对话框，再单击 OK 按钮，即完成离散相模型的设置。



图 7-12　Injections 对话框

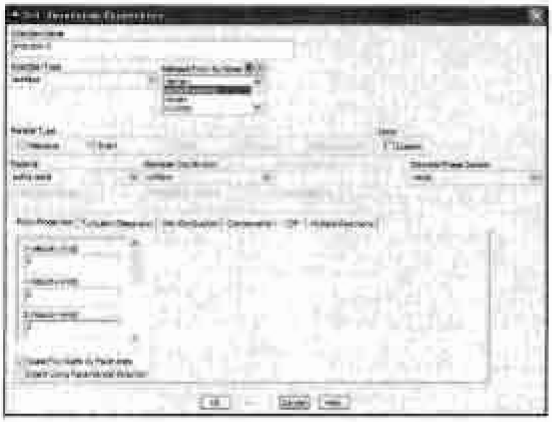


图 7-13 Set Injection Properties 对话框

（9）选择 Problem Setup 下的 Materials 选项，在展开的面板中单击 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，单击 FLUENT Database 按钮，弹出 FLUENT Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表框中的 water-liquid 选项，单击 Copy 按钮。回到 Create/Edit Materials 对话框，单击 Close 按钮。

（10）选择 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，展开 Cell Zone Conditions 面板，单击 Edit 按钮，弹出如图 7-14 所示的 Fluid 对话框，设置 Material Name 为 water-liquid，单击 OK 按钮。

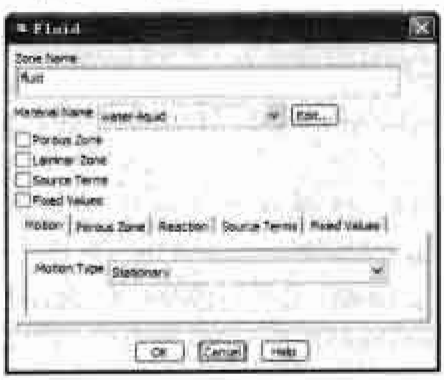


图 7-14 Fluid 对话框

（11）定义本例的边界条件。选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，在 Boundary Conditions 面板中选择 yuanpan 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Wall 对话框，如图 7-15 所示，设置 Wall Motion 为 Moving Wall、Motion 为 Relative to Adjacent Cell Zone 和 Rotational、Speed(rad/s)为 25，其余选项保持默认。然后选择 DPM 选项卡，如图 7-16 所示，设置离散相边界（Boundary Cond. Type）为 reflect（弹性反射），Discrete Phase Reflection Coefficients 和 Erosion Model 保持默认设置，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，依次设置 cemian 和 dimian，其离散相边界设置同圆盘，也为 reflect 形式。而 duichen 边界的设置保持默认即可，如图 7-17 所示，单击 OK 按钮。

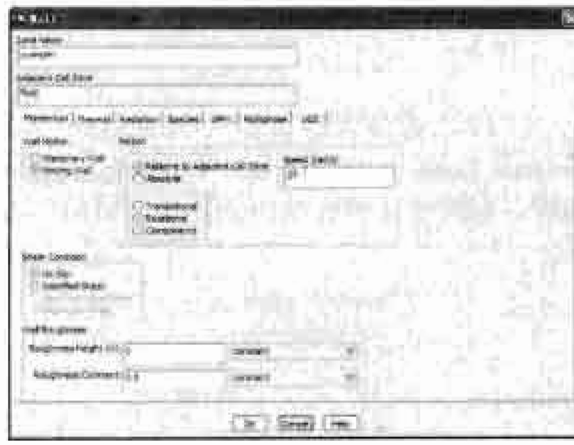


图 7-15 Wall 对话框

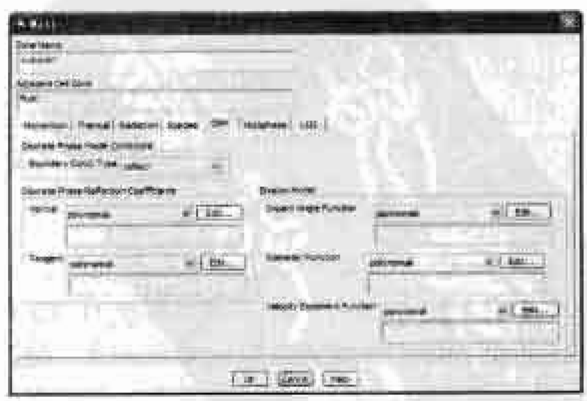


图 7-16 壁面的离散相边界设置



图 7-17 Axis 对话框

（12）边界定义完后，选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开如图 7-18 所示的 Solution Methods 面板，这里保持默认的算法设置。

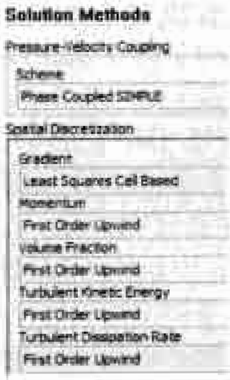


图 7-18　算法设置

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置，如图 7-19 所示。

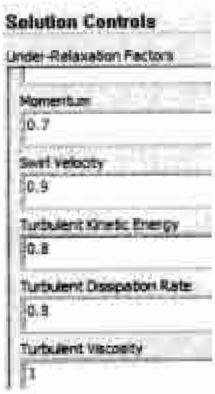


图 7-19　松弛因子

（14）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在展开的面板中选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 7-20 所示的对话框，设置所有项的收敛精度均为 0.001，单击 OK 按钮。

（15）选择 Solution Initialization 面板中的 Compute from 为 all-zones，如图 7-21 所示，单击 Initialize 按钮，然后单击 Reset DPM Sources 按钮，完成初始化。

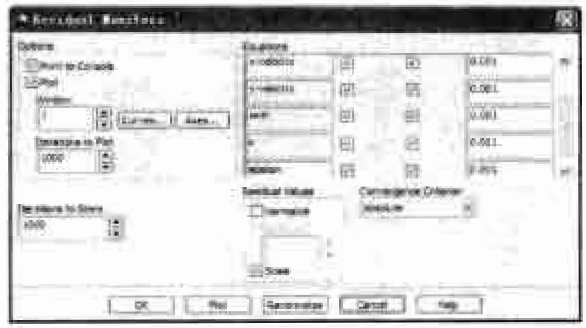


图 7-20　收敛精度设置

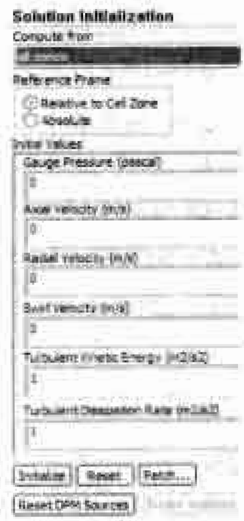


图 7-21　初始化

（16）选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 7-22 所示的面板中设置 Number of Time Steps 为 2000、时间步为 0.001s、方式为 Adaptive，单击 Calculate 按钮开始计算。计算结束后的残差曲线如图 7-23 所示。

（17）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的面板中双击 Contours 选项，弹出 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Discrete Phase Model...和 Discrete Erosion 选项，单击 Display 按钮，可得到如图 7-24 所示的腐蚀情况云图，可见，在圆盘外径速度最大处和侧面的腐蚀情况最为严重。若在 Contours of 栏中选择 Velocity...和 Velocity Magnitude 选项，单击 Display 按钮，

可得到如图 7-25 所示的速度云图，取消选中 Filled 复选框，可得到如图 7-26 所示的速度等值线图。

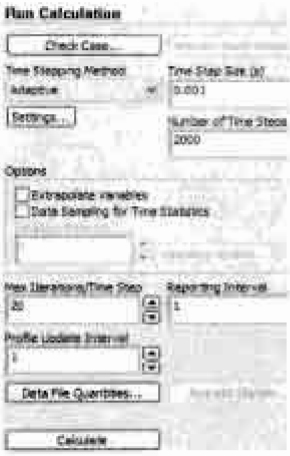


图 7-22　迭代设置

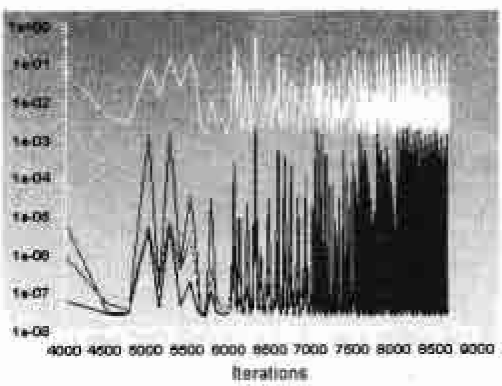


图 7-23　残差曲线

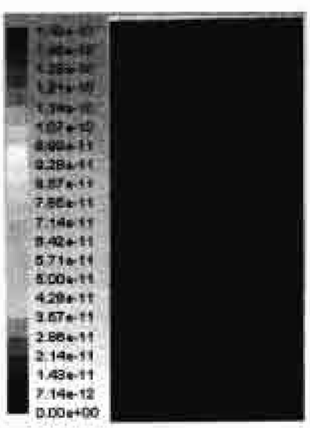


图 7-24　腐蚀情况云图

（18）在 Graphics and Animations 面板中双击 Particle Tracks 选项，弹出如图 7-27 所示的 Particle Tracks 对话框，设置 Release from Injections 为 injection-0、Color by 为 Particle Variables... 和 Particle Residence Time、Pulse Mode 为 Single、Reporting 为 Off，单击 Display 按钮，可在视图窗口中看到颗粒的分布，如图 7-28 所示。

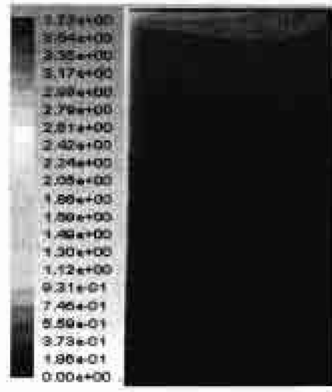


图 7-25　速度云图

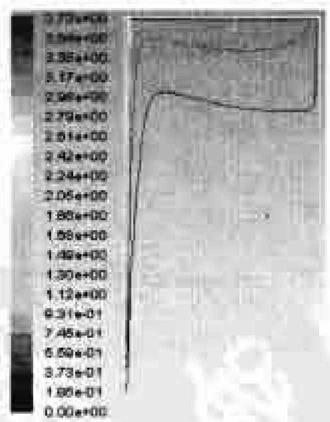


图 7-26　速度等值线图

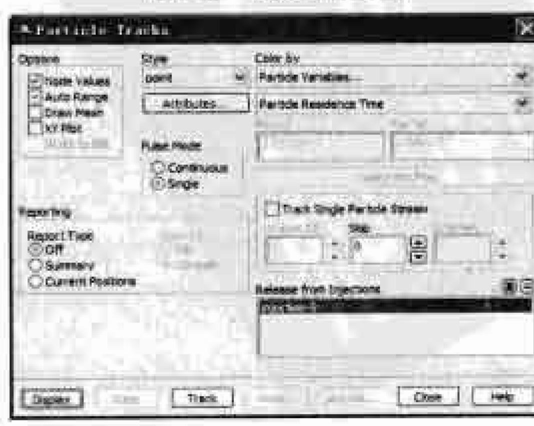


图 7-27　Particle Tracks 对话框

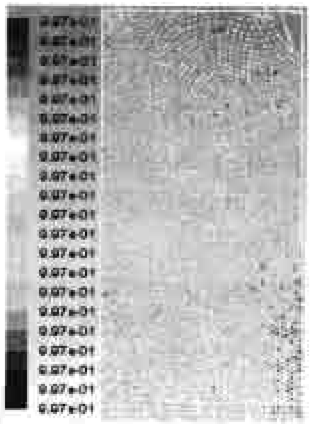


图 7-28 颗粒分布

（19）在 Graphics and Animations 面板中双击 Pathlines 选项，弹出如图 7-29 所示的 Pathlines 对话框，设置 Release from Surfaces 为 default-interior、Steps 为 500、Path Skip 为 20，单击 Display 按钮，得到如图 7-30 所示的迹线图。

（20）图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（7-1.cas 和 7-1.dat）。

（21）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

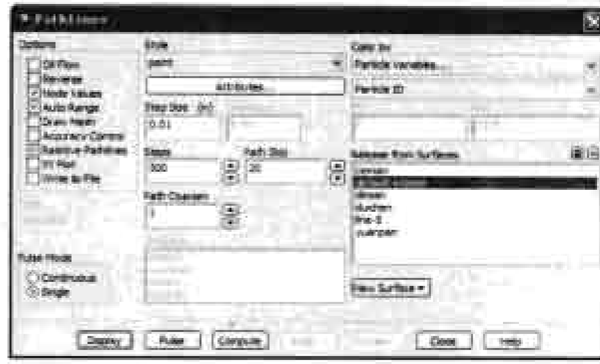


图 7-29 Pathlines 对话框

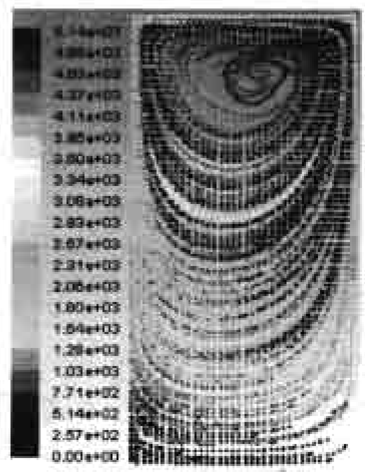


图 7-30 迹线图

7.2 DPM 模型概述及应用

FLUENT 中的离散相模型假定第二相（分散相）非常稀薄，因而颗粒-颗粒之间的相互作用、颗粒体积分数对连续相的影响均未加以考虑。这种假定意味着分散相的体积分数必然很低，一般来说要小于 10%~12%。但颗粒质量承载率可以大于 10%~12%，即用户可以模拟分散相质量流率等于/大于连续相的流动。

稳态拉氏离散相模型适用于具有确切定义的入口与出口边界条件问题，不适用于模拟在连续相中无限期悬浮的颗粒流问题，这类问题经常出现在处理封闭体系中的悬浮颗粒过程中，包括搅拌釜、混合器、流化床。但是，非稳态颗粒离散相模型可以处理此类问题。

在 FLUENT 的其他模型中应用离散相模型的限制如下：

- 选择了离散相模型后，不能再使用周期性边界条件（无论是质量流率还是压差边界条件）。
- 预混燃烧模型中只能使用非反应颗粒模型。
- 同时选择了多参考坐标系与离散相颗粒模型时，在默认情况下，颗粒轨道的显示失去

了其原有意义；同样，相间耦合计算是没有意义的。

稳态离散相问题设定、求解的一般过程如下：

（1）求解连续相流场。

（2）创建离散相喷射源（射流源）。

（3）求解耦合流动。

（4）用 Plot 或 Report 图形界面来跟踪离散相。

非稳态离散相问题设定、求解的一般过程如下：

（1）创建离散相喷射入口。

（2）初始化流场。

（3）设定求解的时间步长和时间步数。在每个时间步，颗粒的位置将得到更新。如果求解问题是非耦合流动，那么，颗粒的位置在每个时间步计算完成之后得到更新的；如果是耦合流动，那么，颗粒的位置在每个时间步内的相间耦合迭代计算过程中都会得到更新。

7.3 离散相轨道计算

在 FLUENT 中，可以通过积分拉氏坐标系下的颗粒作用力微分方程来求解离散相颗粒（液滴或气泡）的轨道。颗粒的作用力平衡方程（颗粒惯性=作用在颗粒上的各种力）在笛卡儿坐标系下的形式（X 方向）为：

$$\frac{\mathrm{d}u_p}{\mathrm{d}t}=F_D(u-u_p)+\frac{g_x(\rho_p-\rho)}{\rho_p}+F_x \tag{7-1}$$

$$F_D=\frac{18\mu}{\rho_p d_p^2}\frac{C_D Re}{24} \tag{7-2}$$

$$Re=\frac{\rho d_p\left|u_p-u\right|}{\mu} \tag{7-3}$$

$$C_D=a_1+\frac{a_2}{Re}+\frac{a_3}{Re^2} \tag{7-4}$$

式中：u 为流体相速度，m/s；u_p 为颗粒速度，m/s；μ 为流体动力粘度，Pa·s；ρ 为流体密度，kg/m^3；ρ_p 为颗粒密度，kg/m^3；d_p 为颗粒直径，m；Re 为相对雷诺数；C_D 为曳力系数；g_x 为 X 方向重力加速度，m/s^2；F_x 为 X 方向的其他作用力，N。

其他作用力如下。

- 视质量力（附加质量力）：是由于要使颗粒周围流体加速而引起的附加作用力。
- 热泳力：悬浮在具有温度梯度的气体流场中的颗粒，受到一个与温度梯度相反的作用力，即热泳力。
- 布朗力：亚观粒子受到布朗力的影响。
- Saffman 升力：由于横向速度梯度（剪切层流动）引起。

当流动状态为湍流时，FLUENT 使用流体的时均速度 $\overline{u}$，通过轨迹方程式（7-1）来计算颗粒的轨道。用户还可以通过考虑流体速度脉动引起的瞬时速度 $u=\overline{u}+u'$ 来计算由于流体湍流引

起的颗粒扩散。

颗粒的湍流扩散既可以通过随机轨道模型模拟，也可以通过代表一定颗粒尺寸组的颗粒群模型模拟。

- 在随机轨道模型中，FLUENT 积分计算颗粒轨道方程中的流体速度为瞬时速度 $u=\bar{u}+u'$，这样，就可以考虑颗粒的湍流扩散。通过这种方法计算足够多的代表性颗粒的轨迹，湍流对颗粒的随机性影响就可以得到考虑。
- 随机游走模型（或涡团生存期模型）考虑了颗粒与流体的离散涡（连续不断的生成-消亡）之间的相互作用。
- 颗粒群模型运用统计方法来跟踪颗粒围绕某一平均轨道的湍流扩散。通过计算颗粒的系统平均运动方程得到颗粒的某个“平均轨道”。

7.4 传热与传质计算

FLUENT 的离散相模型可以计算有反应的颗粒或液滴及其对流体相的影响。

依据定义的颗粒类型，用户可以激活不同的颗粒适用定律。在 Set Injection Properties 对话框中（如图 7-31 所示），一旦选择了特定的颗粒类型，FLUENT 将会选择与之相匹配的适用定律，选中 Laws 栏中的 Custom 复选框，会弹出如图 7-32 所示的 Custom Laws 对话框，可在其中选择相关定律。所有不同类型的颗粒都具有一个预先设定好的适用定律范围，如表 7-1 所示。

除了上面论及的定律外，用户还可以通过 UDF（用户定义函数）来定义不同的定律形式。



图 7-31 颗粒类型



图 7-32 Custom Laws 对话框

表 7-1 颗粒适用定律范围

颗 粒 类 型	特 征	适用定律类型
惰性颗粒	惰性颗粒的加热与冷却	1、6
液滴	加热/蒸发/沸腾	1、2、3、6
燃烧颗粒	加热挥发份析出/颗粒膨胀异相表面反应	1、4、5、6

7.5 喷 雾 模 型

对多数喷射入口，用户需要设定颗粒的初始直径、位置以及速度。但是，对喷雾来说，可以使用模型来模拟液滴的迸裂、合并（团聚）以及不同颗粒形状引起的颗粒曳力系数的变化。

FLUENT 提供了 5 种雾化模型：

- 平口喷嘴雾化（plain-orifice atomizer）。
- 压力-旋流雾化（pressure-swirl atomizer）。
- 靶式雾化（flat-fan atomizer）。
- 气体辅助雾化（air-blast/air-assisted atomizer）。
- 气泡雾化（effervescent/flashing atomizer）。

用户可以在 Set Injection Properties 对话框中选择喷嘴类型及其相应参数。所有的雾化模型都是用喷嘴的物理及尺寸参数（如喷口直径、质量流率）来计算初始颗粒尺寸、速度和位置的。对于实际的喷嘴模拟来说，无论是颗粒的喷射角度还是其喷出时间都是随机分布的。但对 FLUENT 的非雾化喷射入口来说，液滴都是在初始时刻以一个固定的轨道喷射出去的（到流场中去）。喷雾模型中使用随机选择模型得到液滴的随机分布。随机选择轨道表明初始液滴的喷射方向是随机的。所有的喷嘴模型中都要设置初始喷射角（范围），颗粒通过随机的方法在这个范围内得到一个初始喷射方向。这种方法提高了由喷射占主导地位流动的计算精度。在喷嘴附近，液滴在计算网格内的分布趋向于更加均匀，这样，通过气相作用于液滴上的曳力就加强了气相-液滴之间的耦合作用。

- 平口喷嘴是最常见也是最简单的一种雾化器。液体在喷嘴内部得到加速，然后喷出，形成液滴。平口喷嘴可分为单相区、空穴区、回流区 3 个不同的工作区，不同工作区的转变是个突然的过程，并且产生截然不同的喷雾状态。喷嘴内部区域决定了流体在喷嘴处的速度、初始颗粒尺寸以及液滴分散角。
- 压力-旋流雾化喷嘴使得流体通过一个称作旋流片的喷头被加速后，进入中心旋流室。在旋流室内，旋转的液体被挤压到固壁，在流体中心形成空气柱，然后，液体以不稳定的薄膜状态从喷口喷出，破碎成丝状物及液滴。在气体透平、燃油炉、直接喷射点火式汽车内燃机的液体燃料燃烧中，压力-旋流雾化喷嘴使用很广泛。
- 靶式雾化喷嘴与压力-旋流雾化喷嘴很类似，只是它形成了液膜层，而不是旋流。液体从宽而薄的喷口出来后形成平面液膜，继而破碎成液滴。一般认为，它的雾化机理与压力-旋流雾化喷嘴类似。
- 为了加速液膜的破碎，喷嘴经常会添加辅助气体。液体通过喷嘴的作用形成液膜，气

体则直接冲击液膜以加速液膜的破碎，这种雾化被称为气体辅助雾化。通过辅助气体的作用，可以得到更小的雾滴。这种提高雾化质量的作用机制并不清楚，一般的看法是，辅助气体加剧了液膜的不稳定性。同时，气体有助于液滴的分散，防止液滴间的碰撞。气体雾化喷嘴同压力-旋流雾化喷嘴一样被广泛应用，尤其是用在要求雾化粒径很小的场合。

◆ 气泡雾化喷嘴中，液体中混合了过热液体（相对下游工况）或者类似的介质，当挥发性液体从喷嘴喷出时，迅速发生相变，相变使流体迅速以很大的分散角破碎成小液滴。由于对气泡雾化的机理不甚清楚，所以模型必须依赖于实验拟合结果。

7.6 DPM 模型初始条件设置

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch7\7-6.avi 文件。

DPM 模型的主要设置是初始条件，均可在 Set Injection Properties 对话框中完成。初始条件定义了离散相每组颗粒流的起始位置、速度及其他各种参数，这些初始条件构成了决定每个颗粒的瞬时状态值的颗粒因变量的初值。

只要创建一个射流源（injection），并且对其设定了各种属性，用户就可以对颗粒/液滴定义初始条件。FLUENT 提供了如下 10 种类型的射流源：

◆ 单点射流源（single）。
◆ 组射流源（group）。
◆ 锥形射流源（仅适用于三维情况）（cone (only in 3D)）。
◆ 面射流源（surface）。
◆ 平口雾化喷嘴（plain-orifice atomizer）。
◆ 压力-旋流雾化喷嘴（pressure-swirl atomizer）。
◆ 平板扇叶（flat-fan atomizer）。
◆ 空气辅助雾化（air-blast atomizer）。
◆ 气泡雾化喷嘴（effervescent atomizer）。
◆ 从文件中读取射流源数据（read from a file）。

若仅希望对每种初始条件设定单值，用户应该创建单点射流源；若希望对初始条件设定为一个范围（即一个尺寸范围或初始位置范围），应该创建一个组射流源；若定义一个三维情况下的中空锥形射流源，应创建一个锥形射流源；若想在一个面（既可以是区域面（zone surface），也可以是在 Surface 列表框中定义的表面）上抛撒颗粒，应该创建一个面射流源（若用户创建了面射流源，颗粒流将在所设定面上的每个子面被抛撒出去）。在三维情况下，用户可以使用 Plane Surface 面板中的 Bounded 和 Sample Points 选项来创建一个关于颗粒的矩形网格射流源。若上述的射流源类型不能表示出用户所需要设定的射流源，那么，也可以从外部文件中读取数据获得颗粒的初始条件（颗粒位置、速度、直径以及质量流率）。

当设定一系列初始条件时，用户还应该定义如下颗粒的类型。

- 惰性颗粒（inert）：是服从力平衡及受到加热/冷却影响的一种离散相类型（颗粒、液滴或气泡）。在 FLUENT 任何模型中，惰性颗粒总是可选的。
- 液滴（droplet）：是一种存在于连续相气流中的液体颗粒。它也服从力平衡并受到加热/冷却的影响。此外，还需由定律 2（液滴蒸发定律）、定律 3（液滴沸腾定律）确定自身的蒸发与沸腾。只有传热选项被激活并且至少有两种化学组分在计算中被激活，或者已经选择了非预混燃烧或部分预混燃烧模型时，液滴类型才是可选的。当选择了液滴类型之后，用户还应该使用理想气体定律来定义气相密度。
- 燃烧颗粒（combusting）：是一种固体颗粒，它遵从力平衡、加热冷却过程、挥发份析出过程及异相表面反应机制。若在 Set Injection Properties 对话框中选择 Wet Combustion 选项卡，则可在燃烧颗粒中包含有可蒸发物质。这样，颗粒的可蒸发物质在挥发份开始析出之前，经历由定律 2（液滴蒸发定律）、定律 3（液滴沸腾定律）所确定的蒸发与沸腾过程。当计算涉及包含 3 种以上化学组分的热量转移，或者启用了非预混燃烧模型，燃烧颗粒才是可选的。选定燃烧类型颗粒之后，用户不需要使用理想气体定律来定义气相密度。

其余需要定义的射流源属性主要包括颗粒的介质、颗粒直径的分布方式、射流源的位置、速度、颗粒直径、温度、质量流量及湍流对颗粒的影响等，如图 7-33 所示。



图 7-33　Set Injection Properties 对话框

7.7　DPM 模型边界条件设置

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch7\7-7.avi 文件。

当颗粒与模型物理边界（如壁面或入口）相交时，FLUENT使用离散边界条件来确定轨迹

在边界应该满足的条件。模型中的离散相边界条件在每个流域可以单独定义，可选的边界条件如下。

- reflect 边界条件：反射边界，颗粒在此处反弹而发生动量变化，变化量由反弹系数确定。
- trap 边界条件：捕捉边界，此处颗粒被标记为 trapped 并终止了轨道计算。
- escape 边界条件：逃逸边界，此处颗粒被标记为 escaped 并终止了轨道计算。
- interior 边界条件：内部边界，颗粒在此处将穿越内部流动区域。

当激活 DPM 模型时，进出口及壁面边界均有 DPM 选项卡，如图 7-34 所示，在 Discrete Phase Model Conditions 栏中的 Boundary Cond.Type 下拉列表框中可以选择 reflect、trap 或 escape 边界条件。对于诸如辐射体、多孔介质间断面类型等的内部流动边界，用户可以选择 interior 边界条件（此条件意味着颗粒将会穿越此内部边界）。



图 7-34　DPM 边界设置

若用户在某个 wall 边界选定了 reflect 类型边界条件（仅在 wall 边界才可选），那么，可以在 Discrete Phase Reflection Coefficients 栏中把法向（切向）恢复系数定义为 constant、polynomial、piecewise-linear 或 piecewise-polynomial。

若在 Discrete Phase Model 对话框中选中 Erosion/Accretion 复选框，那么，必须在壁面才能设定磨蚀速率表达式，它是质量流率、颗粒直径函数、冲击角和速度项的乘积。在 Wall 对话框中的 Erosion Model 栏中，用户可以把冲击角函数、直径函数和速度项也定义为常数、多项表达式、分段线性函数或分段多项表达式形式的函数。

7.8　DPM 模型介质属性设置

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch7\7-8.avi 文件。

为了正确计算离散相的颗粒轨道以及传热/传质量，还需要定义 3 种类型离散相颗粒的介质

属性，如表 7-2 所示。

表 7-2　需定义的介质属性

属　性	惰性颗粒	液　滴	燃烧颗粒
密度	√	√	√
比热	√	√	√
导热率	√	√	
粘度		√	
潜热		√	√
蒸发温度		√	√
沸点温度		√	√
挥发份含量分数		√	
双元扩散系数		√	
饱和蒸汽压		√	
热解吸热量		√	
液滴表面张力		√	
颗粒辐射发射率（黑度）	√	√	√
颗粒辐射散射系数	√	√	√
热泳力系数	√	√	√
膨胀系数			√
燃尽的化学计量数			√
燃烧分数			√
燃尽反应放热量			√
反应放热中加热固体的分数			√
活化能			√
煤炭网格中的初始桥键分数			√
初始炭桥键分数			√
网格配位数			√
官能团分子量			√
侧链官能团分子量			√

在用户第一次定义射流源的特定颗粒类型时，可以从材料数据库中直接复制某个材料，此种颗粒材料将变为这种颗粒类型的复制材料类型，即此时再创建这种颗粒类型的新射流源时，用户已经选定的颗粒材料就是这个新定义的射流源的颗粒材料。如果需要的话，用户可以修改预设的颗粒材料的各种性质。

提示： 只有用户定义了某种类型的颗粒射流源之后，在 Materials 面板中的 Material Type 下拉列表框中才会出现此种类型颗粒的材料。

多数情况下，对于某个给定的模型，设定离散相颗粒的一些简单物理性质（密度、比热等）就可以了。但有时，在单个模型中可能包含两种不同类型的惰性、液滴或燃烧颗粒（如较重颗粒和气泡或两种不同的蒸发性液滴），在这种情况下，用户需要对这两种（或更多）不同

颗粒设定不同的物性，即定义两种以上的惰性、液滴或燃烧类型颗粒，然后分别设定相应的属性来解决这个问题。

7.9 实例·操作——气动喷砂流场

气动喷砂以压缩空气为动力，磨料通过喷嘴加速后，喷射到零件表面，可用于表面强化、表面清洗等工作，如图 7-35 所示，广泛应用于机械、石油、化工、汽车和船舶等行业。喷嘴是气动喷砂系统中的关键部件之一，其作用是改变气固两相流体的运动和动力特性，对喷砂系统的清理效率影响最大。





图 7-35 气动喷砂

喷嘴剖面通常采用变截面形式，以使单相气体在通过变截面缩放喷嘴时获得更大的动量，这归根到底是改变了气动喷砂流场及其流动特性，那么，喷砂室内的气固两相流场究竟如何呢？本例即对气动喷砂喷嘴内部的气固两相流场进行模拟，以得到喷砂室内的气固流速分布和固体颗粒的分布情况，具体的模型尺寸如图 7-36 所示。



图 7-36 喷砂室尺寸

【思路分析】

由于喷砂室属于对称结构，故这里只需建立一般的模型，再采用对称边界条件。模拟采用 DPM 模型，入口设置为压力入口，固体颗粒在入口均匀分布，随气流射入喷砂室。出口设置为压力出口，压强为 1Pa。壁面边界采用无滑移边界。计算可看作定常流。固体颗粒源源不断由入口喷入，再从出口喷出，整个模拟流程如图 7-37 所示。

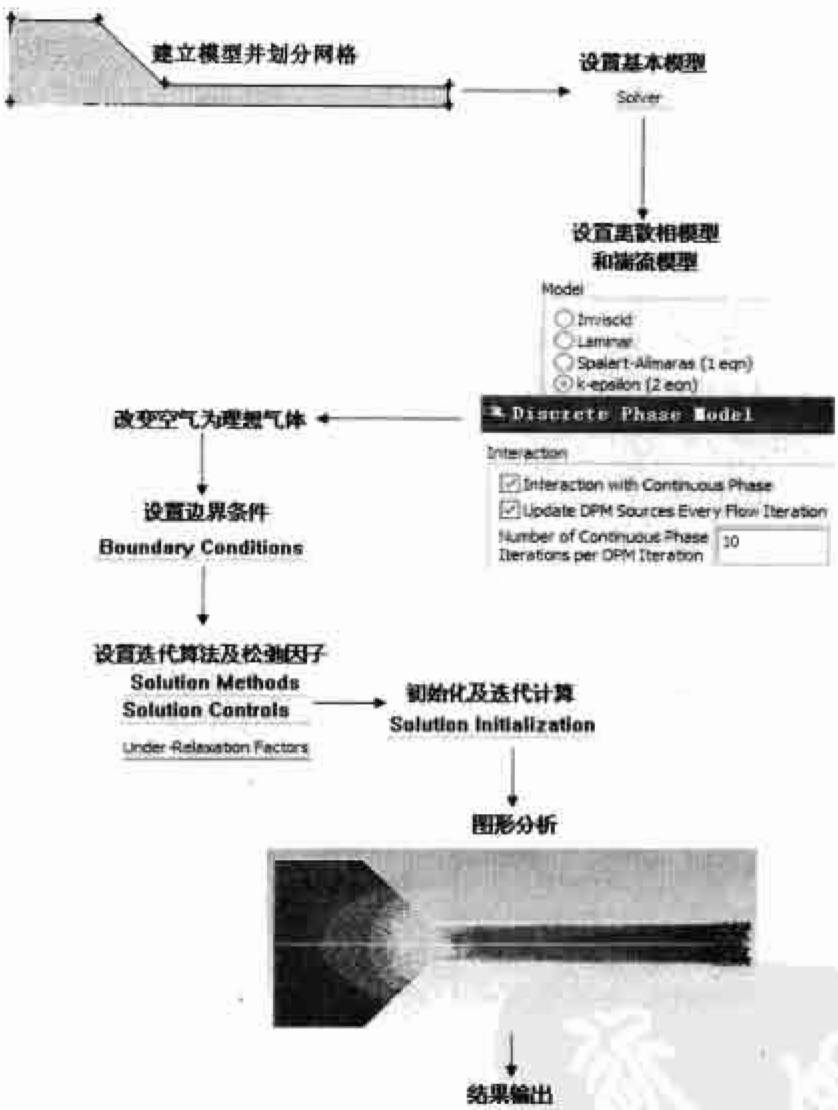


图 7-37　气动喷砂流场模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch7\7-9.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch7\7-9.cas，7-9.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch7\7-9.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器，如图 7-38 所示。

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 7-9.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，网格加载如图 7-39 所示。

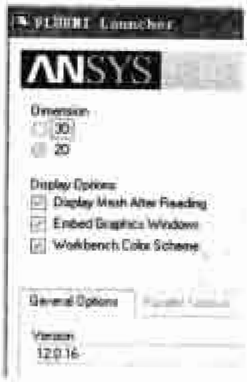


图 7-38 启动 2D 解算器

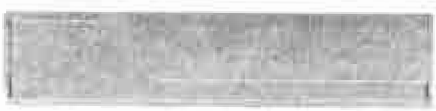


图 7-39 网格

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在展开的 General 面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，如图 7-40 所示，对话框中显示了模型的尺寸范围，这里无须改动，单击 Close 按钮，关闭对话框。

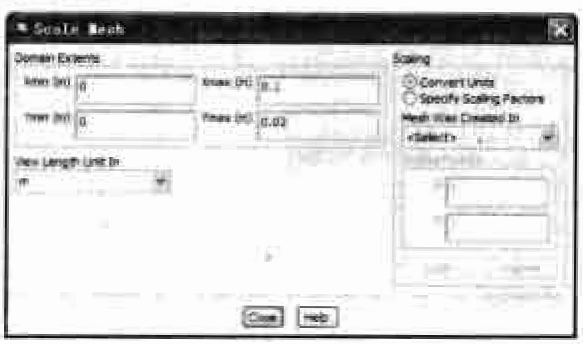


图 7-40 Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）在 General 面板的 Solver 栏中进行基本模型设置，这里无须改动。

（6）在 Models 面板中双击 Energy-Off 选项，在弹出的 Energy 对话框中选中能量方程，单击 OK 按钮。然后，双击 Viscous-Laminar 选项，弹出如图 7-41 所示的 Viscous Model 对话框，选中 Standard 和 k-epsilon 单选按钮，单击 OK 按钮。



图 7-41 Viscous Model 对话框

（7）双击 Models 面板中的 Discrete Phase-Off 选项，弹出如图 7-42 所示的 Discrete Phase Model 对话框，选中 Interaction with Continuous Phase 和 Update DPM Sources Every Flow Iteration 复选框。然后选择 Physical Models 选项卡，选中 Options 栏中的 Erosion/Accretion 复选框。再在 Discrete Phase Model 对话框中选择 Numerics 选项卡，选中 Options 栏中的 Accuracy Control 复选框，在 Tolerance 数据输入框中输入“1e-05”，调整 Max.Refinements 为 20，并选中 Tracing Scheme Selection 栏中的 Automated 复选框。

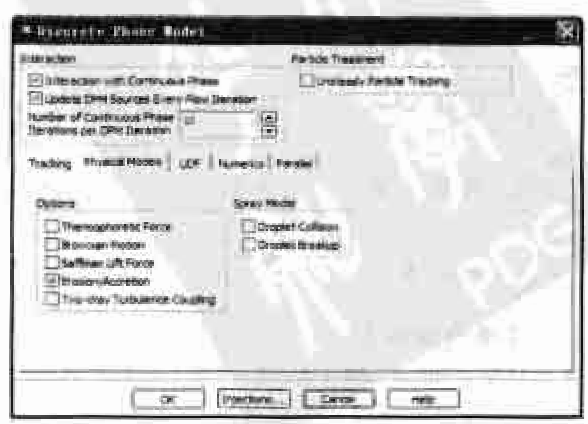


图 7-42 Discrete Phase Model 对话框

（8）单击 Discrete Phase Model 对话框中的 Injections 按钮，弹出 Injections 对话框，单击 Create 按钮，弹出 Set Injection Properties 对话框，如图 7-43 所示。选择 Injection Type 为 group，Number of Particle Streams 设为 10，Particle Type 设置为 Inert（惰性颗粒），在 Material 下拉列表框中选择颗粒材料为 steel，Diameter Distribution（颗粒分布）选择为 linear。然后选择对话框中的 Point Properties 选项卡，并在 First Point 栏中设置 X-Velocity (m/s)为 1，Diameter(m)为 0.001，Temperature (K)为 300，Flow Rate(kg/s)为 0.001，其余为 0，在 Last Point 栏中设置 Y-position(m)为 0.02，X-Velocity(m/s)为 1，Diameter(m)为 0.001，Temperature(K)为 300，Flow Rate(kg/s)为 0.001，其余为 0，单击 OK 按钮。回到 Injections 对话框，单击 Close 按钮。回到 Discrete Phase Model 对话框，再单击 OK 按钮，即完成离散相模型的设置。

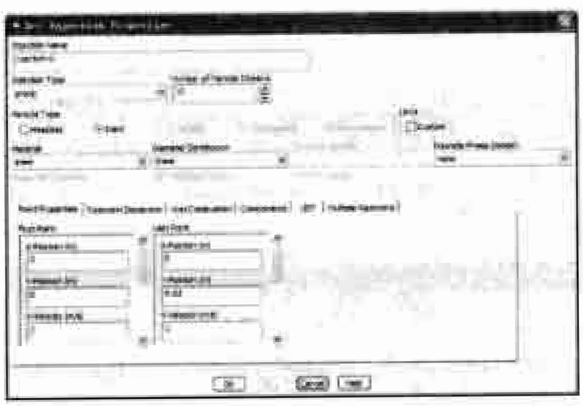


图 7-43　Set Injection Properties 对话框

（9）双击 Materials 面板中的 air 选项，弹出如图 7-44 所示的 Create/Edit Materials 对话框，设置 Properties 栏中的 Density(kg/m3)，从下拉列表中选择 ideal-gas（理想气体模型）选项，单击 Change/Create 按钮。

（10）选择 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，展开 Cell Zone Conditions 面板，单击 Edit 按钮，弹出如图 7-45 所示的 Fluid 对话框，确认 Material Name 下拉列表框中的材料为 air，单击 OK 按钮。

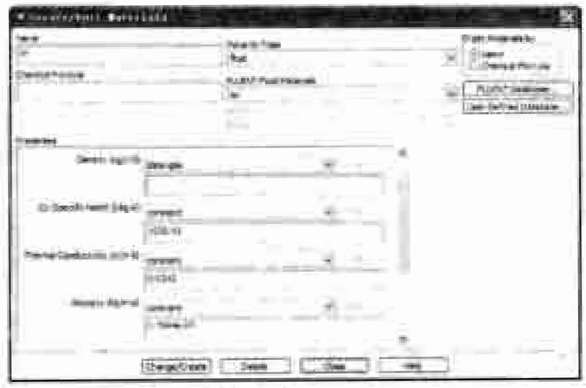


图 7-44　Create/Edit Materials 对话框



图 7-45　Fluid 对话框

（11）在 Cell Zone Conditions 面板右下角单击 Operating Conditions…按钮，弹出操作环境设置对话框，设置操作压强为 0Pa，单击 OK 按钮。

（12）定义本例的边界条件，选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，在 Boundary Conditions 面板中选择 in 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 7-46 所示的 Pressure Inlet 对话框，设置总压为 600000，静压为 599900，选择 Turbulence 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity(%) 为 1，Hydraulic Diameter(m)为 0.04。然后选择 Thermal 选项卡，设置进口温度为 300K。再选择 DPM 选项卡，设置 Discrete Phase BC

Type 为 escape，如图 7-47 所示，单击 OK 按钮，完成压力入口设置。回到 Boundary Conditions 面板中，选择 out 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 7-48 所示 Pressure Outlet 对话框，设置总压为 0，选择 Turbulence 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Backflow Turbulent Intensity(%)为 1、Backflow Hydraulic Diameter (m)为 0.01，出口温度与离散相边界设置同入口，单击 OK 按钮。对于喷砂室的壁面离散相边界，均保持其默认的反射边界（reflect）设置。

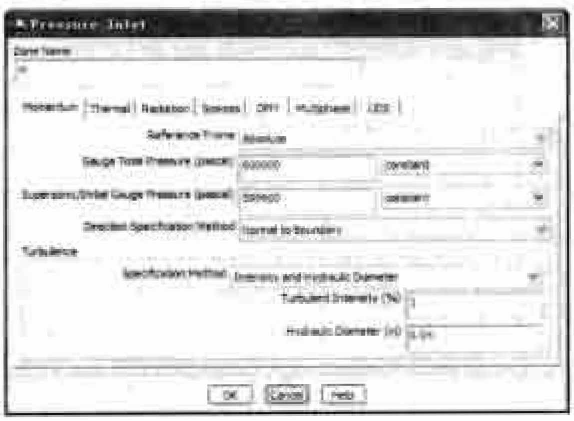


图 7-46　Pressure Inlet 对话框



图 7-47　入口离散相边界设置

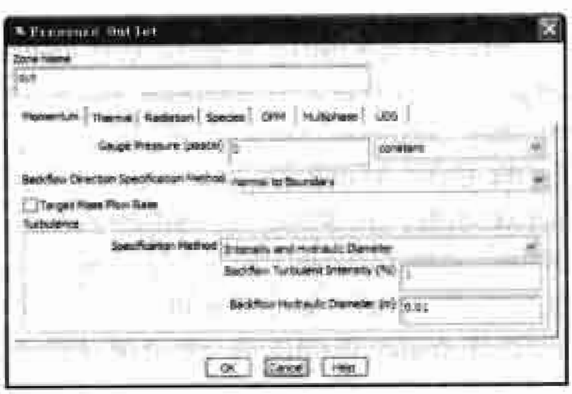


图 7-48　Pressure Outlet 对话框

（13）边界定义完后，选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开如图 7-49 所示的 Solution Methods 面板，这里保持默认的算法设置。

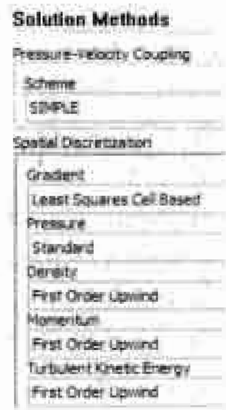


图 7-49　算法设置

（14）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置。

（15）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在展开的面板中选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 7-50 所示的对话框，设置 energy 的收敛精度为 1e-06，其余保持默认，单击 OK 按钮。

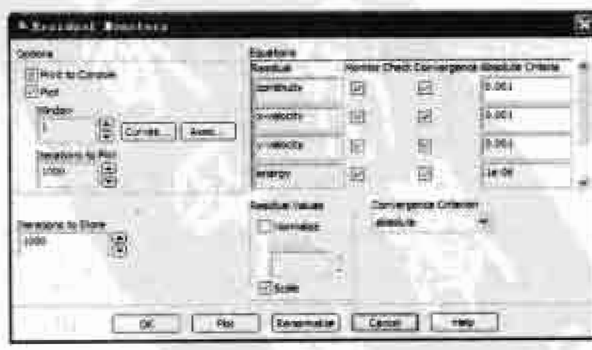


图 7-50　收敛精度设置

（16）选择 Solution Initialization 面板中的 Compute from 为 in，如图 7-51 所示，单击 Initialize 按钮，然后单击 Reset DPM Sources 按钮，完成初始化。

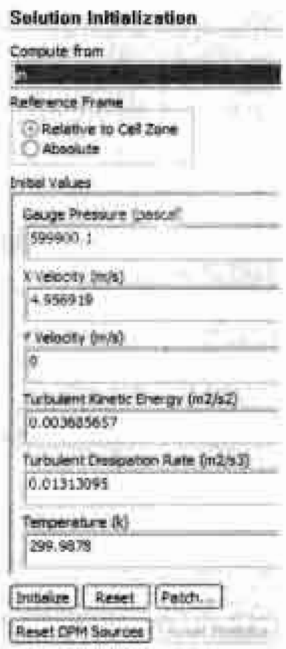


图 7-51　初始化

（17）选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 7-52 所示的面板中设置 Number of Iterations 为 1000，单击 Calculate 按钮开始计算。计算结束后的残差曲线如图 7-53 所示。

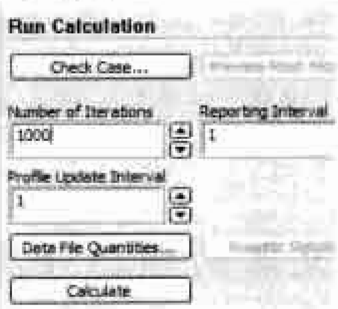


图 7-52　迭代设置

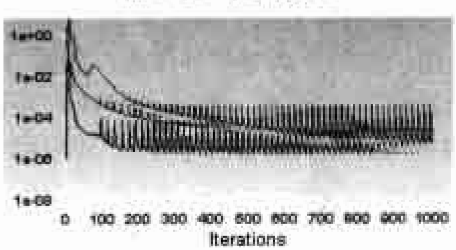


图 7-53　残差曲线

（18）选择面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的面板中双击 Contours 选项，弹出 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Pressure…和 Static Pressure 选项，单击 Display 按钮，可在视图窗口中看到如图 7-54 所示的压强云图。若在 Contours of 栏中选择 Velocity… 和 Velocity Magnitude 选项，单击 Display 按钮，可得到如图 7-55 所示的速度云图，而将 Velocity Magnitude 改为 Mach Number，取消选中 Filled 复选框，可得到如图 7-56 所示的马赫数等值线图。若在 Contours 对话框的 Contours of 栏中选择 Discrete Phase Model…和 Discrete Erosion 选项，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，单击 Display 按钮，可得到如图 7-57 所示的腐蚀情况云图。由图可见，在收缩段壁面的腐蚀情况最为严重。

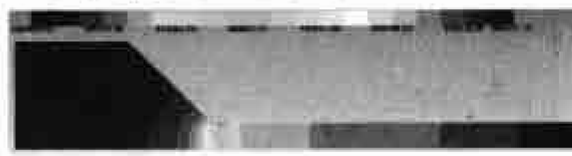


图 7-54　压强云图

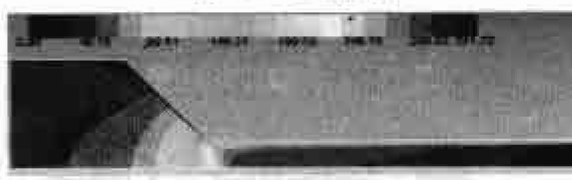


图 7-55　速度云图

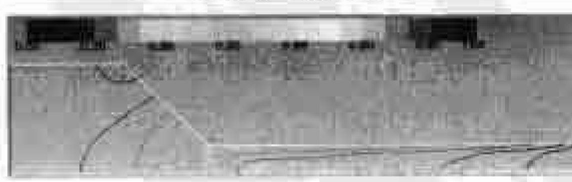


图 7-56　马赫数等值线图



图 7-57　腐蚀情况云图

（19）在 Graphics and Animations 面板中

双击 Particle Tracks 选项，弹出如图 7-58 所示的 Particle Tracks 对话框，选择 Release from Injections 为 injection-0，在 Options 栏中选中 Node Values 和 Auto Range 复选框，Style 设置为 line（线型），并在 Color by 栏中选择 Particle Variables... 和 Particle Residence Time 选项，Pulse Mode 设置为 Single，Report Type 设置为 Off，单击 Display 按钮，可在视图窗口中看到固相颗粒的分布情况，如图 7-59 所示。

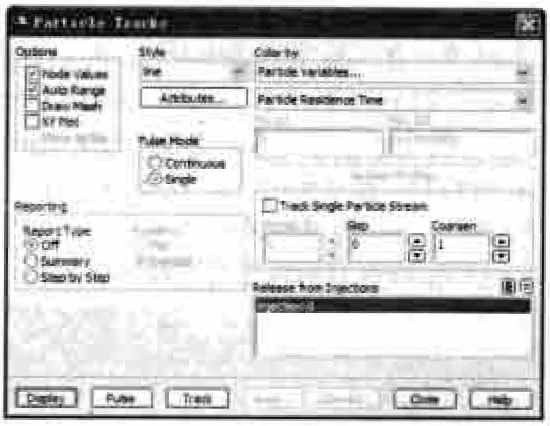


图 7-58　Particle Tracks 对话框

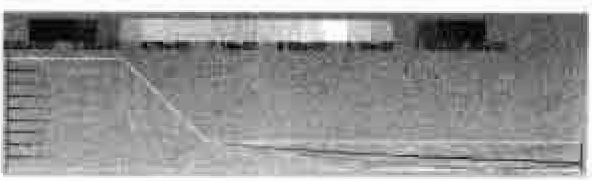


图 7-59　颗粒分布

（20）在 Graphics and Animations 面板中双击 Pathlines 选项，弹出如图 7-60 所示的 Pathlines 对话框，选择 Release from Surfaces 为 in，设置 Steps 为 500，单击 Display 按钮，得到如图 7-61 所示的迹线图。

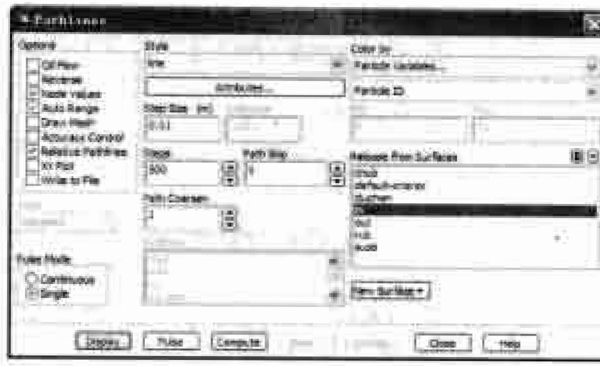


图 7-60　Pathlines 对话框

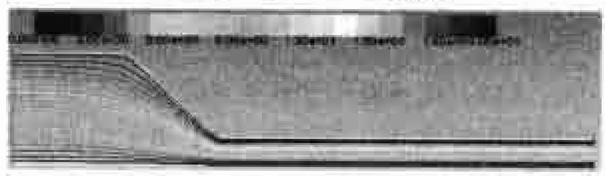


图 7-61　迹线图

（21）图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（7-9.cas 和 7-9.dat）。

（22）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

7.10　实例・练习——水力旋流器的颗粒分离

水力旋流器是一种用途十分广泛的分离设备，可用于完成液体澄清、料浆浓缩、固相颗粒洗涤、液相除气与除砂、固相颗粒分级与分类以及两种非互溶液体的分离等多种作业，如图 7-62 所示。它开始在选矿和采矿工业中获得应用，后来又逐渐在化工、石油、食品、医药、环保、造纸和纺织等行业获得成功应用，而且由于水力旋流器的结构及形式日趋多样化，其应用领域仍在不断拓展。

水力旋流器作为分离分级设备的基本工作原理是离心沉降作用。当待分离的两相混合液以一定的压力从水力旋流器上部周边切向进入器内后，产生强烈的旋转运动，由于轻相和重相存在密度差，所受的离心力、向心浮力和流体曳力的大小不同，受离心沉降作用，大部分重相经

旋流器底流口排出，而大部分轻相则由溢流口排出，从而达到分离目的。

本例即对水力旋流器内的流场进行模拟研究，所计算的模型尺寸如图 7-63 所示，进料口水的流速为 0.9m/s，温度为 290K，上部溢流口的溢流量为 0.175。

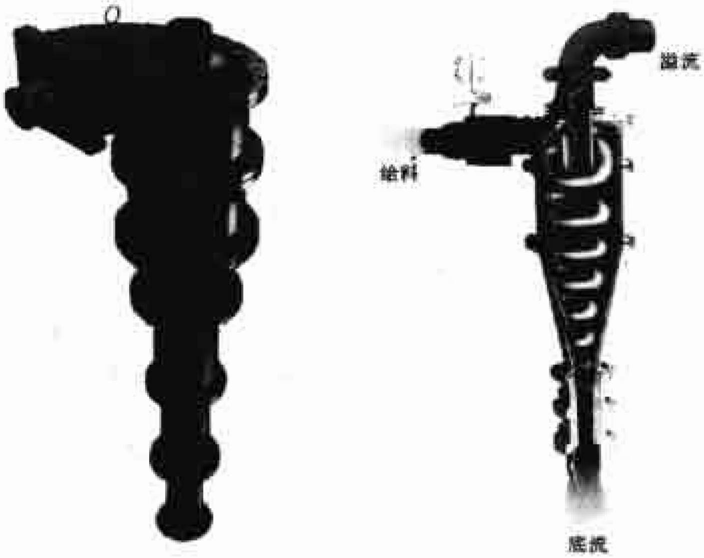


图 7-62 水力旋流器

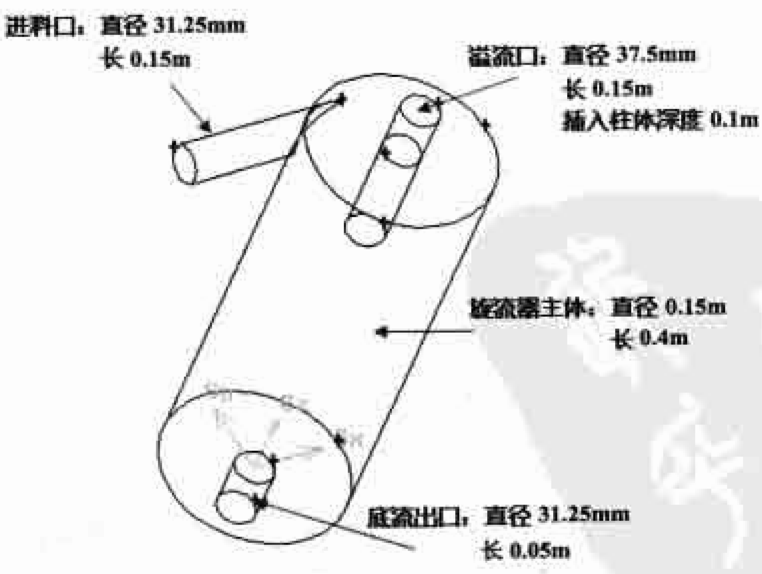


图 7-63 水力旋流器模型尺寸

【思路分析】

本例需要建立三维模型，入口设置为速度入口，溢流口和底流出口均设置为自由出流出口。计算时先计算水的单相流场，待流场稳定后，加入离散相颗粒再进行计算，整个模拟流程如图 7-64 所示。

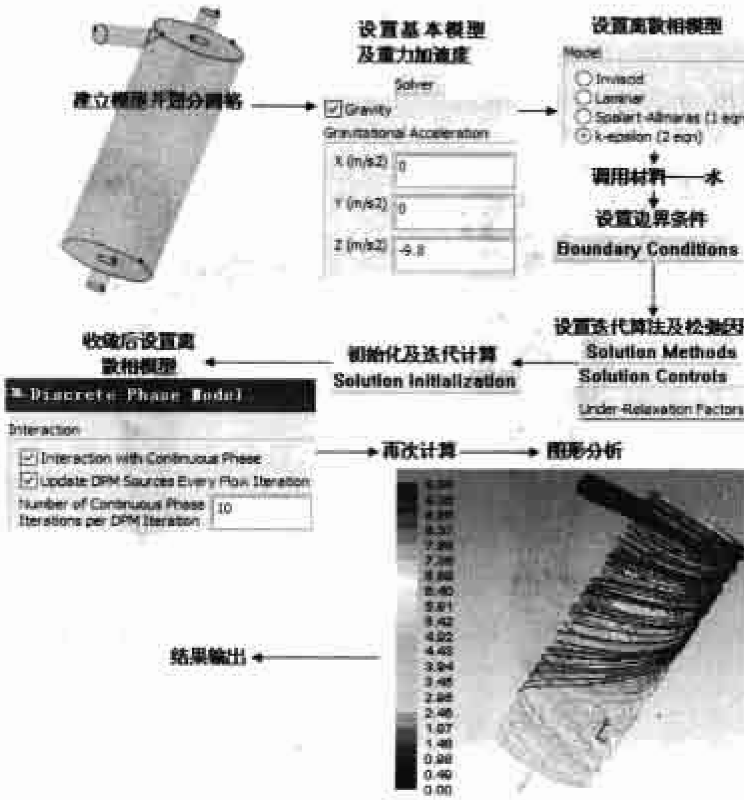


图 7-64　水力旋流器流场模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch7\7-10.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch7\7-10.cas，7-10.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch7\7-10.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 3D 解算器，如图 7-65 所示。

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 7-10.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，网格加载如图 7-66 所示。

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在打开的面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，如图 7-67 所示，对话框中显示了模型的尺寸范围，这里无须改动，单击 Close 按钮，关闭对话框。



图 7-65　启动 3D 解算器

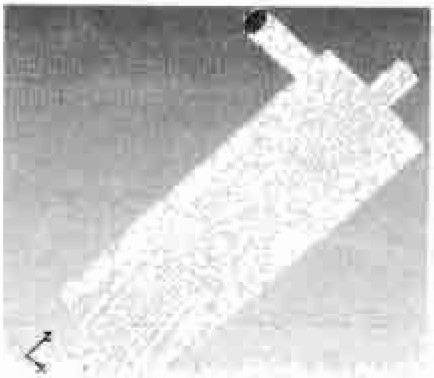


图 7-66 网格

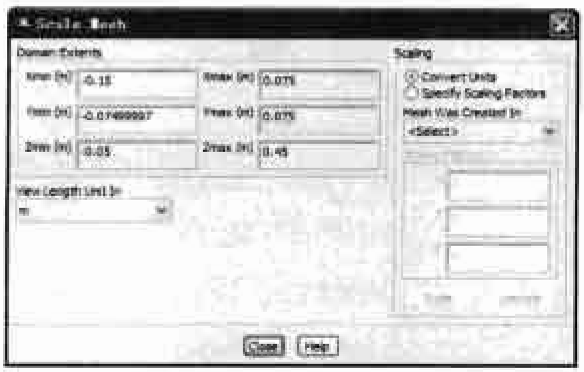


图 7-67 Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）在 General 面板的 Solver 栏中选中 Gravity 复选框，并设置 Z(m/s2)为-9.8，如图 7-68 所示。

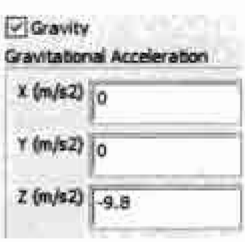


图 7-68 重力加速度设置

（6）在 Models 面板中双击 Energy-Off 选项，在弹出的 Energy 对话框中选中 Energy Equation 复选框，启用能量方程计算，单击 OK 按钮。然后双击 Viscous-Laminar 选项，弹出如图 7-69 所示的 Viscous Model 对话框，选中 Standard 和 k-epsilon 单选按钮，单击 OK 按钮。

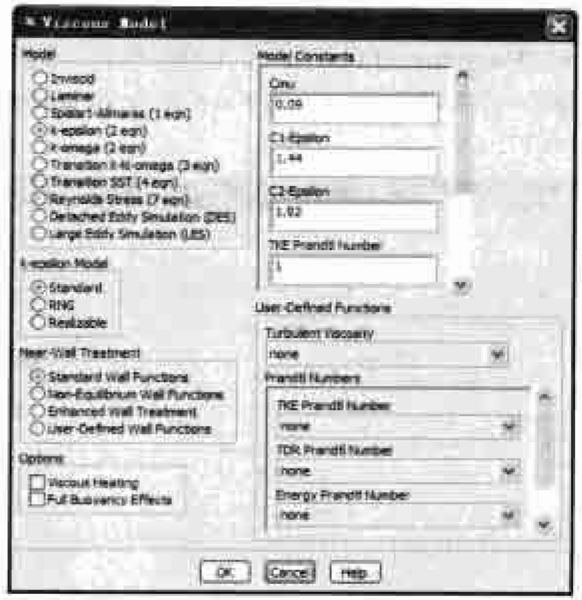


图 7-69 Viscous Model 对话框

（7）选择 Problem Setup 下的 Materials 选项，在展开的面板中单击 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，单击 FLUENT Database 按钮，弹出 FLUENT Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表框中的 water-liquid 选项，单击 Copy 按钮。回到 Create/Edit Materials 对话框，单击 Close 按钮。

（8）选择 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，展开 Cell Zone Conditions 面板，单击 Edit 按钮，弹出 Fluid 对话框，在 Material Name 下拉列表框中选择 water-liquid 选项，单击 OK 按钮。

（9）选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，在 Boundary Conditions 面板中选择 in 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 7-70 所示的 Velocity Inlet 对话框，设置进口速度为 0.9m/s，选择 Turbulence 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity(%)为 1、Hydraulic Diameter(m)为 0.03125。然后选择 Thermal 选项卡，设置进口温度为 290K。进口定义完后，回到 Boundary Conditions 面板

中选择 di-out 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 7-71 所示的 Outflow 对话框，设置 Flow Rate Weighting 为 0.825，单击 OK 按钮。按照同样的方式设置 yi-out 的 Flow Rate Weighting 为 0.175。

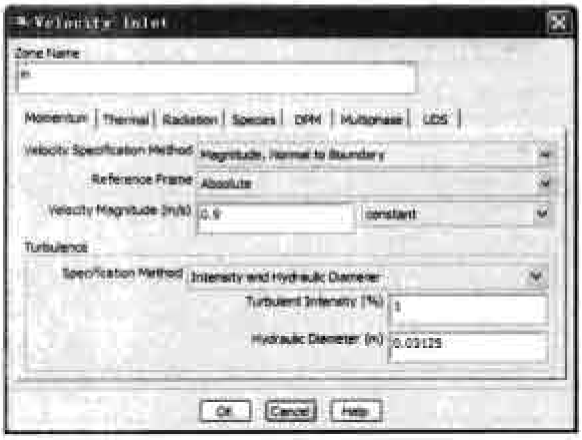


图 7-70　Velocity Inlet 对话框



图 7-71　Outflow 对话框

（10）边界定义完后，选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，保持默认的算法设置。

（11）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置。

（12）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在展开的面板中选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 7-72 所示的对话框，设置 energy 的收敛精度为 1e-06，其余选项保持默认，单击 OK 按钮。

（13）选择 Solution Initialization 面板中的 Compute from 为 in，如图 7-73 所示，单击 Initialize 按钮，完成初始化。

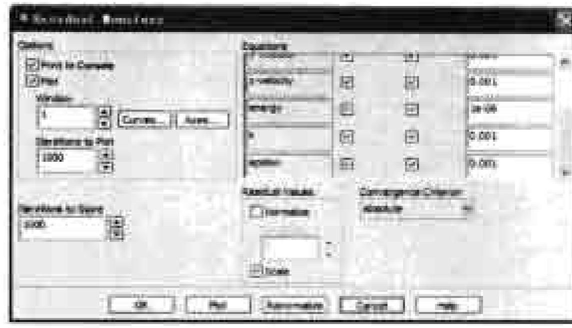


图 7-72　收敛精度设置

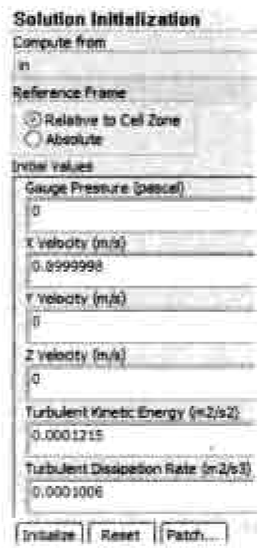


图 7-73　初始化

（14）选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 7-74 所示的面板中设置 Number of Iterations 为 500，单击 Calculate 按钮开始计算。

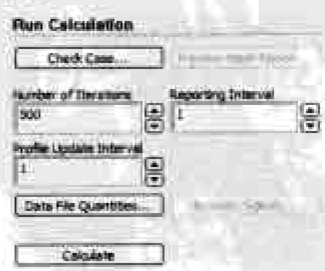


图 7-74　迭代设置

（15）计算收敛后，选择 Surface→Plane 命令，弹出 Plane Surface 对话框，在 Points 栏中输入 3 点坐标（利用 3 点生成一个面），

并定义 New Surface Name 为 plane-15，如图 7-75 所示。这里，共生成 Z=0.1、Z=0.2、Z=0.3、Z=0.37 和纵向剖面 5 个辅助面，名称分别为 z1、z2、z3、z4 和 zh。

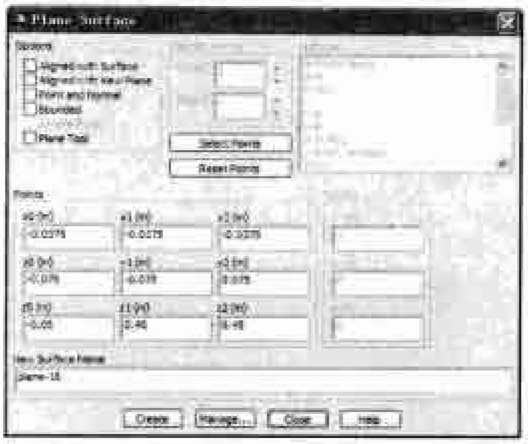


图 7-75　Plane Surface 对话框

（16）启动离散相计算。双击 Models 面板中的 Discrete Phase-Off 选项，弹出如图 7-76 所示的 Discrete Phase Model 对话框，选中 Interaction with Continuous Phase 和 Update DPM Sources Every Flow Iteration 复选框。然后，设置 Tracking Parameters 栏中的 Max.Number of Steps 为 3000，在 Drag Parameters 栏中设置 Drag Law 为 nonspherical、Shape Factor 为 0.3。

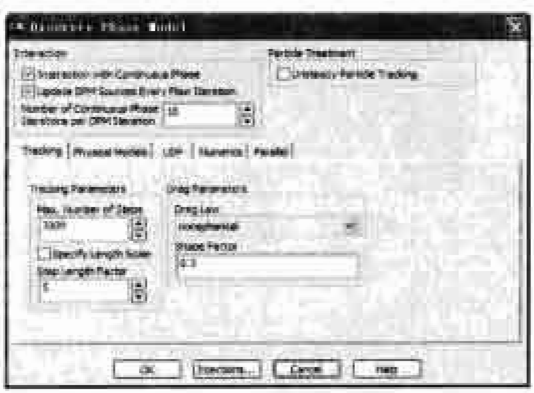


图 7-76　Discrete Phase Model 对话框

（17）单击 Discrete Phase Model 对话框中的 Injections 按钮，弹出 Injections 对话框，单击 Create 按钮，弹出 Set Injection Properties 对话框，如图 7-77 所示。设置 Injection Type 为 surface、Release From Surfaces 为 in，Particle Type 设置为 Inert，在 Material 下拉列表框中选择颗粒材料为 wood，在 Diameter Distribution（颗粒分布）下拉列表框中选择 rosin-rammler 选项。然后选择 Point Properties 选项卡，并于 First Point 下方设置 X-Velocity(m/s) 为 0.9、Temperature(K) 为 290、Total Flow Rate (kg/s) 为 0.0007、Min.Diameter(m) 为 6e-05、Max.Diameter(m) 为 0.0007、Mean Diameter(m) 为 0.00035、Spread Parameter 为 3.5、Number of Diameters 为 10，其余为 0，单击 OK 按钮。回到 Injections 对话框，单击 Close 按钮。回到 Discrete Phase Model 对话框，再单击 OK 按钮，即完成离散相模型的设置。

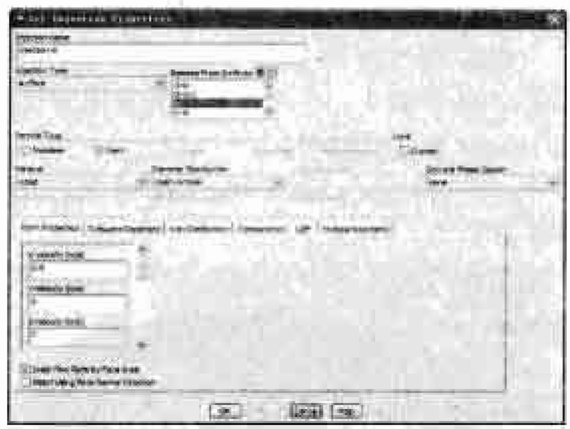


图 7-77　Set Injection Properties 对话框

（18）单击 Solution Initialization 面板中的 Reset DPM Sources 按钮。

（19）选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，设置 Number of Iterations 为 500，单击 Calculate 按钮继续计算，计算结束后的残差曲线如图 7-78 所示。

（20）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的面板中双击 Contours 选项，弹出 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Velocity...和 Velocity Magnitude 选项，并选择 Surfaces 列表框中的 z1、z2、

z3、z4 和 zh，单击 Display 按钮，可得到如图 7-79 所示的速度云图。若在 Contours of 栏中选择 Pressure...和 Static Pressure 选项，单击 Display 按钮，可得到如图 7-80 所示的压强云图。

（21）在 Graphics and Animations 面板中双击 Particle Tracks 选项，弹出 Particle Tracks 对话框，选择 Release from Injections 为 injection-0，在 Options 栏中选中 Node Values 和 Auto Range 复选框，Style 选择为 line（线型），并在 Color by 栏中选择 Particle Variables...和 Particle Residence Time 选项，Pulse Mode 设置为 Single，Report Type 设置为 Off，Skip 设置为 10，单击 Display 按钮，可在视图窗口中看到固相颗粒的分布情况，如图 7-81 所示。

（22）图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（7-10.cas 和 7-10.dat）。

（23）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

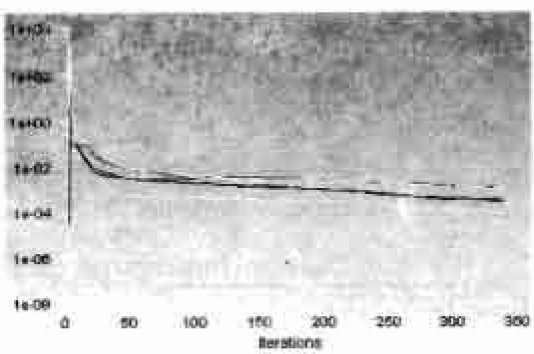


图 7-78 残差曲线

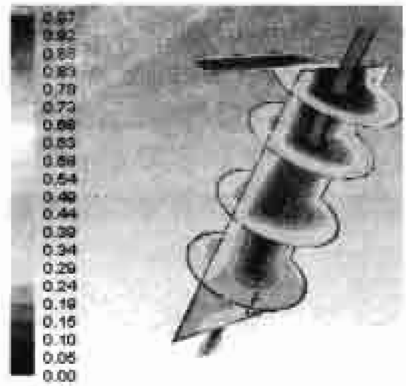


图 7-79 速度云图

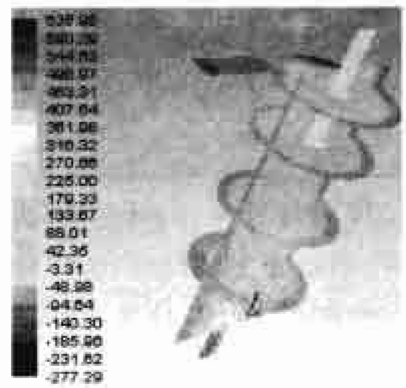


图 7-80 压强云图

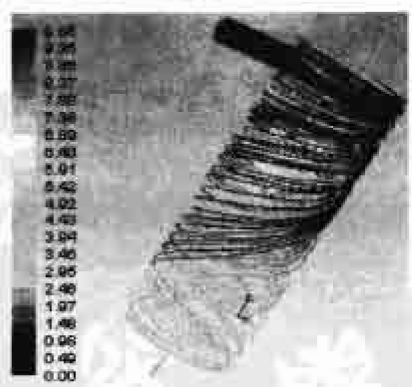


图 7-81 固相颗粒分布

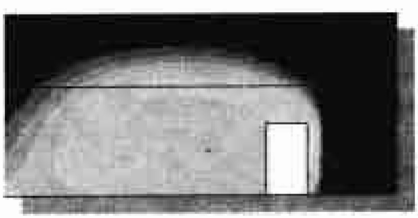
第 8 讲　组分输运与化学反应模型

FLUENT 强大的化学反应模拟能力能够模拟各种复杂的燃烧和化学反应过程，多年来帮助工程师们解决了多个工程实际难题，如 No_x 和其他污染形成的气相反应、炭颗粒的燃烧等。

本讲针对 FLUENT 的组分输运与化学反应模型展开介绍，阐述其模型的设置方法和步骤，并列举 3 个实例帮助读者认识和掌握该模型的实际操作。

本讲内容

- 实例·模仿——甲烷燃烧器模拟
- 组分输运与化学反应模型概述
- 组分输运与化学反应模型设置
- 实例·操作——输气管路泄漏扩散
- 实例·练习——液体燃料燃烧





8.1　实例·模仿——甲烷燃烧器模拟

圆柱型甲烷火焰燃烧器是工程中常用的燃烧器之一，如图 8-1 所示。那么，甲烷进入燃烧器之后是怎么燃烧的？燃烧是否完全？燃烧完后的产物浓度是多少？这些都是工程实际中面临的问题。本例针对圆柱型甲烷火焰燃烧器内的燃烧情况进行模拟，以得到各浓度分布，计算模型的具体尺寸如图 8-2 所示。

【思路分析】

本例为轴对称问题，故建立二维的一半模型，设置中轴为对称轴。甲烷燃烧生成二氧化碳和水，故可选用单步完成反应机制的燃烧模型，并使用涡耗散模型对其进行模拟。具体的模拟流程如图 8-3 所示。

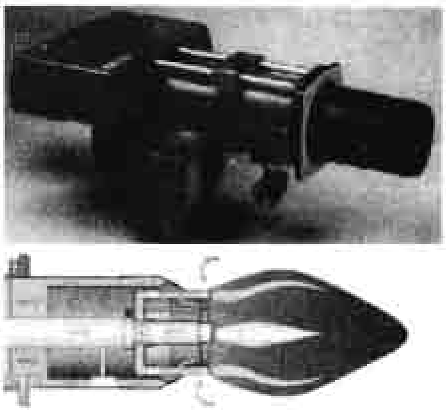


图 8-1　甲烷燃烧器

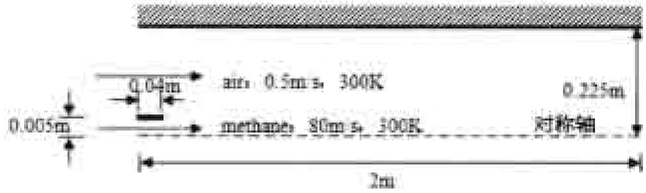


图 8-2　计算模型尺寸



图 8-3　甲烷燃烧器模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch8\8-1.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch8\8-1.cas，8-1.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch8\8-1.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器，如图 8-4 所示。

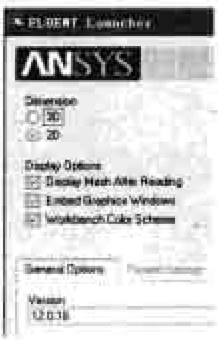


图 8-4　启动 2D 解算器

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 8-1.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，网格加载如图 8-5 所示。



图 8-5　网格

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在展开的面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，如图 8-6 所示，对话框中显示了模型的尺寸范围，这里无须改动，单击 Close 按钮，关闭对话框。

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）在 General 面板的 Solver 栏中进行基本模型设置，这里选择 2D Space 为 Axisymmetric，如图 8-7 所示。

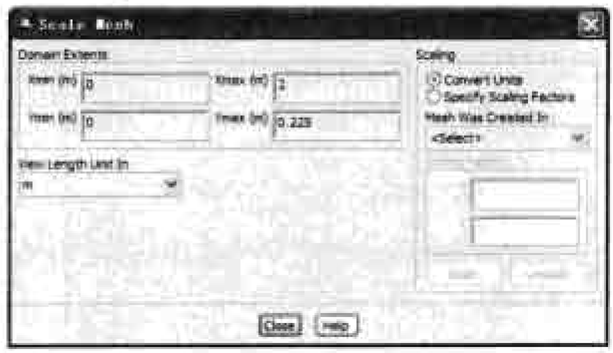


图 8-6　Scale Mesh 对话框



图 8-7　轴对称模型设置

（6）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，双击 Energy-Off 选项，弹出 Energy 对话框，如图 8-8 所示，选中其中的 Energy Equation 复选框，启动能量方程计算，单击 OK 按钮。然后回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框，如图 8-9 所示，选中 k-epsilon(2 eqn)单选按钮，并选择 k-epsilon Model 为 Standard，单击 OK 按钮。



图 8-8　Energy 对话框

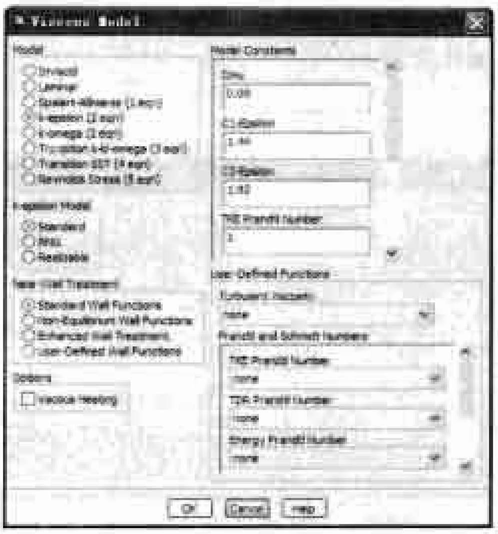


图 8-9　Viscous Model 对话框

（7）启动组分输运与化学反应模型。双击 Models 面板中的 Species-Off 选项，弹出如图 8-10 所示的 Species Model 对话框，选中 Model 栏中的 Species Transport 单选按钮，并选中 Reactions 栏中的 Volumetric 复选框，此时 Turbulence-Chemistry Interaction 栏中出现几个选项，本例选中 Eddy-Dissipation 单选按钮，即启动了涡耗散模型。接着在 Mixture Material 下拉列表框中选择 methane-air 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 8-11 所示的 Edit Material 对话框，单击 Mixture Species 右侧的 Edit 按钮，弹出如图 8-12 所示的 Species 对话框，其中的 Selected Species 为已选组分列表框，从上到下依次设置为甲烷、氧气、二氧化碳、水和氮气，满足质量分数逐渐增加的规律（最大组分——氮气在最下端），单击 OK 按钮。回到 Edit Material 对话框，单击 Reaction 右侧的 Edit 按钮，弹出如图 8-13 所示的 Reactions 对话框，从中可以看到，Arrhenius Rate 栏中的系数均为灰色显示，这是因为选用了涡耗散模型，而忽略了 Arrhenius 反应速率的化学动力学影响所致。Reactions 对话框还反映了本例完成的化学反应方程 $CH_4+2O_2 \rightarrow CO_2+2H_2O$，保持对话框中所有默认设置，单击 OK 按钮。回到 Edit Material 对话框，单击 Change 按钮。最后，回到 Species Model 对话框，单击 OK 按钮，即完成组分输运与化学反应模型的设置。

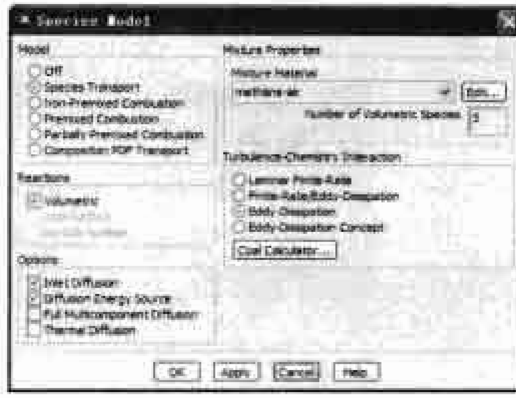


图 8-10　Species Model 对话框

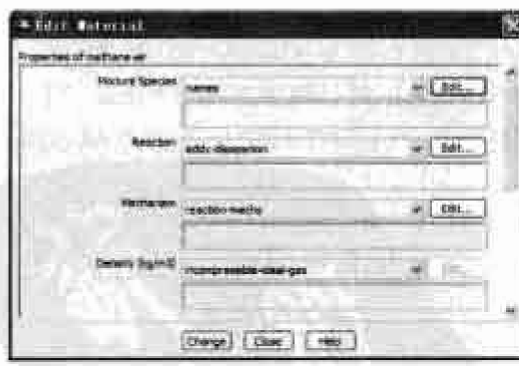


图 8-11　Edit Material 对话框



图 8-12　Species 对话框

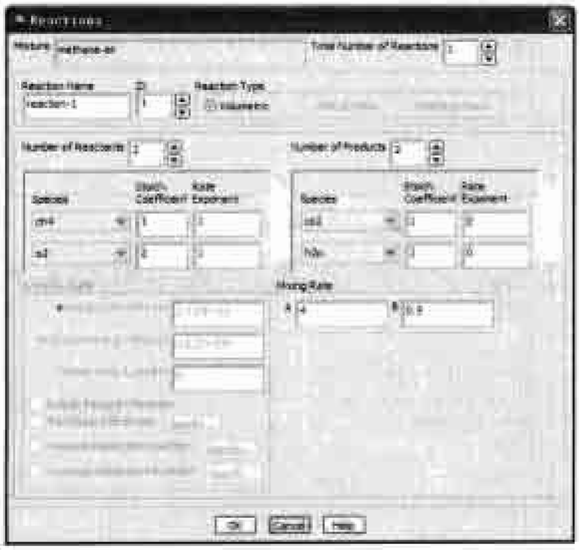


图 8-13 Reactions 对话框

（8）由于燃烧产生的高温会使各组分的比热随温度发生变化，所以需要设置材料的比热。单击 Materials 面板中的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，选择 Material Type 为 fluid，然后选择 FLUENT Fluid Materials 为 carbon-dioxide[co2]，设置其 Cp(Specific Heat)(j/kg-k)为 piecewise-polynomial（分段多项式）方式，如图 8-14 所示，单击 Edit 按钮，弹出如图 8-15 所示的 Piecewise-Polynomial Profile 对话框，保持其默认设置，单击 OK 按钮。回到 Materials 面板中单击 Change/Create 按钮更改材料属性。按照同样的设置方法，设置甲烷、氧气、水、氮气的比热，这里不再详述。

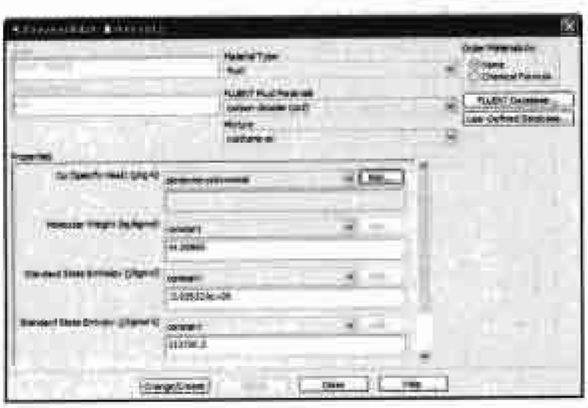


图 8-14 Create/Edit Materials 对话框

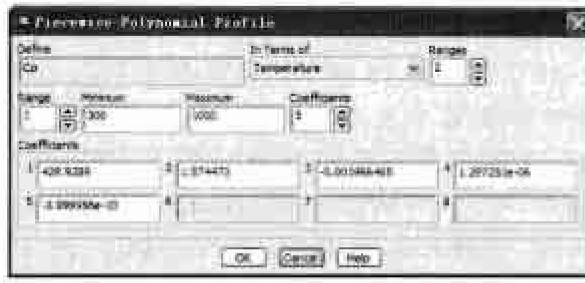


图 8-15 Piecewise-Polynomial Profile 对话框

（9）选择 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，在展开的面板中单击 Edit 按钮，弹出如图 8-16 所示的 Fluid 对话框，可以看到其中的 Reaction 复选框已被选中，且 Reaction Mechanism 为设置的反应机制，单击 OK 按钮。

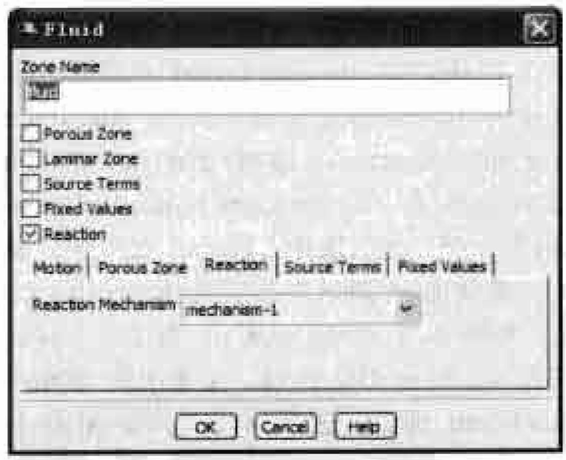


图 8-16 Fluid 对话框

（10）单击 Cell Zone Conditions 面板右下角的 Operating Conditions 按钮，弹出操作环境设置对话框，这里保持默认设置，单击 OK 按钮。

（11）定义本例的边界条件。选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，在 Boundary Conditions 面板中选择 a-in 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，如图 8-17 所示，设置 Velocity Magnitude(m/s)为 0.5，并选择其湍流方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity(%)为 10、Hydraulic Diameter(m)为 0.44。然后选

择 Thermal 选项卡，设置空气进口温度为 300K，如图 8-18 所示。接着选择 Species 选项卡，设置空气进口的组分，如图 8-19 所示，这里只需设置 o2 为 0.23 即可，其余保持为 0，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，选择 m-in 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 8-20 所示的对话框，设置 Velocity Magnitude (m/s)为 80，同样选择其湍流方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity (%)为 10、Hydraulic Diameter(m)为 0.01。然后选择 Thermal 选项卡，设置其进口温度也为 300K。接着选择 Species 选项卡，如图 8-21 所示，设置 ch4 为 1，其余保持为 0，单击 OK 按钮。再次回到 Boundary Conditions 面板，选择 out 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 8-22 所示的 Pressure Outlet 对话框，保持总压为 0，选择其湍流方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Backflow Turbulent Intensity(%)为 10、Backflow Hydraulic Diameter (m)为 0.45。然后选择 Thermal 选项卡，设置出口温度也为 300K。接着选择 Species 选项卡，如图 8-23 所示，设置 o2 为 0.23，其余保持为 0，单击 OK 按钮。重新回到 Boundary Conditions 面板，选择 wall 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 8-24 所示的 Wall 对话框，选择 Thermal 选项卡，设置其为定温边界，温度为 300K，单击 OK 按钮。

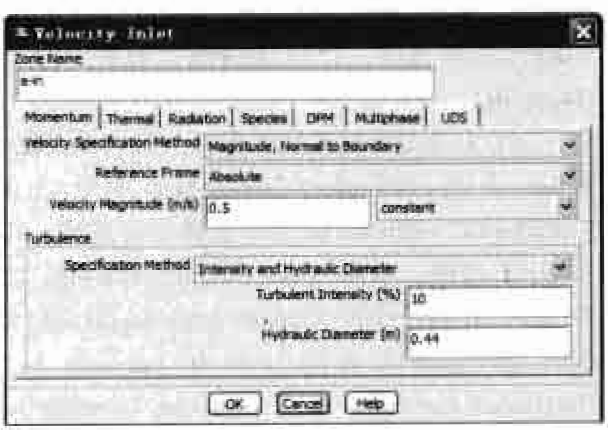


图 8-17　空气进口速度设置



图 8-18　空气进口温度设置

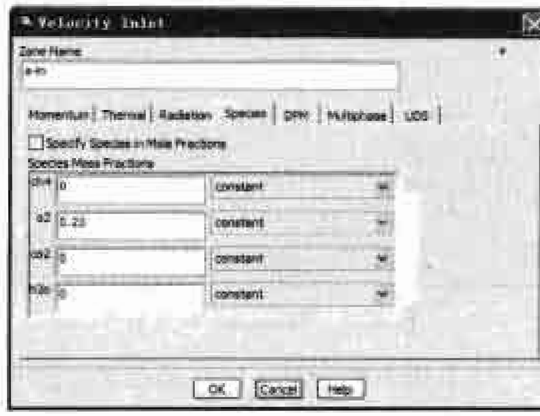


图 8-19　空气进口组分设置

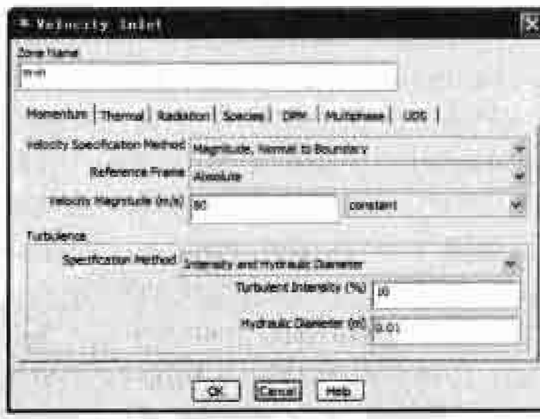


图 8-20　甲烷进口速度设置

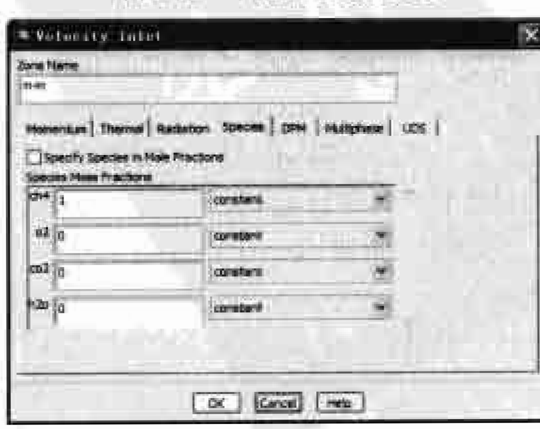


图 8-21　甲烷进口组分设置

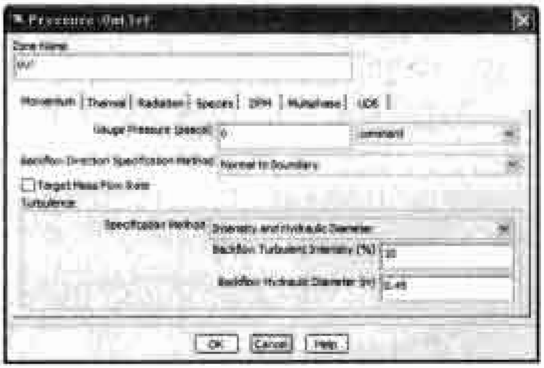


图 8-22　出口压强设置

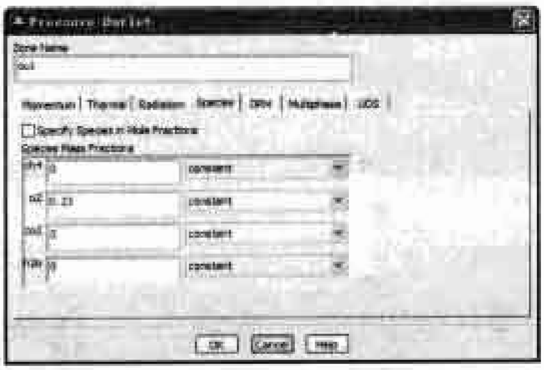


图 8-23　出口组分设置

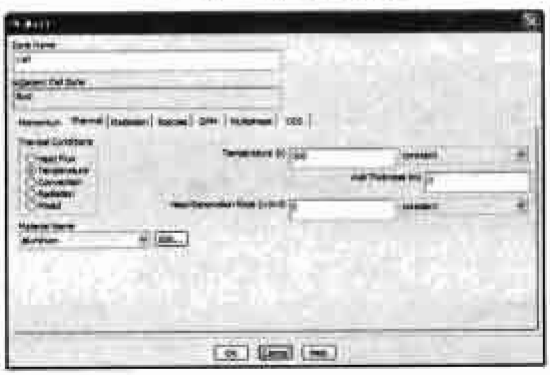


图 8-24　燃烧器壁面设置

（12）边界定义完后，选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，保持默认的算法设置。选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置。

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在展开的面板中选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 8-25 所示的对话框，设置 energy 的精度为 1e-06，其余项的收敛精度均为 0.001，单击 OK 按钮。

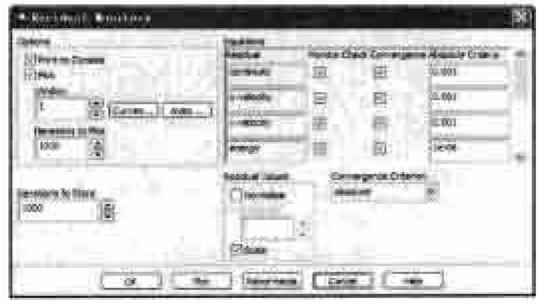


图 8-25　收敛精度设置

（14）选择 Solution Initialization 面板中的 Compute from 为 all-zones，如图 8-26 所示，单击 Initialize 按钮。

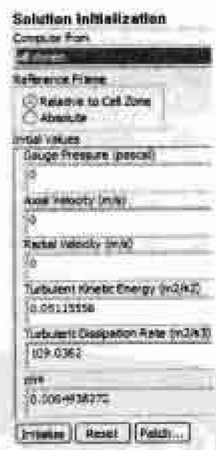


图 8-26　初始化

（15）选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 8-27 所示的面板中设置 Number of Iterations 为 500，单击 Calculate 按钮开始计算。计算结束后的残差曲线如图 8-28 所示。

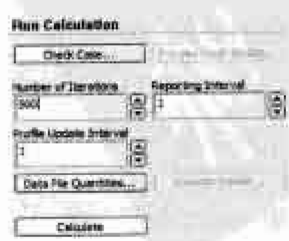


图 8-27　迭代设置

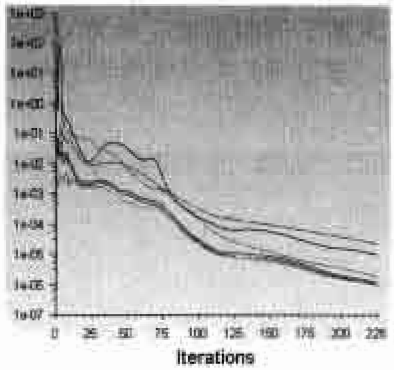


图 8-28 残差曲线

（16）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在面板右下角单击 Views 按钮，弹出如图 8-29 所示的 Views 对话框，选中 Mirror Planes 列表框中的 axis 选项，单击 Apply 按钮，即显示对称结构的另一半。



图 8-29 Views 对话框

（17）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 命令，在展开的面板中双击 Contours 选项，弹出 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Temperature...和 Static Temperature 选项，单击 Display 按钮，可得到如图 8-30 所示的温度云图。若在 Contours of 栏中选择 Properties...和 Specific Heat[Cp]选项，单击 Display 按钮，可得到如图 8-31 所示的定压比热的分布云图。改变 Contours of 栏中选项为 Species...和 Mass fraction of ch4，单击 Display 按钮，可看到此时的甲烷浓度分布云图，如图 8-32 所示。若将 Mass fraction of ch4 改为 Mass fraction of o2，单击 Display 按钮，可得到如图 8-33 所示的氧气浓度的分布云图。按照同样的方法，还可以得到二氧化碳和水的浓度分布云图，如图 8-34 和图 8-35 所示。

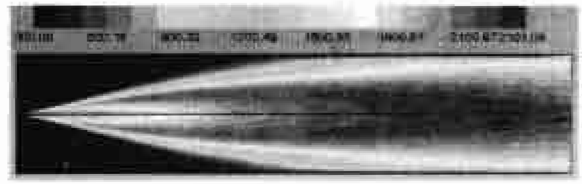


图 8-30 温度云图

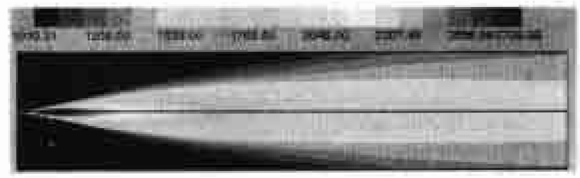


图 8-31 定压比热云图



图 8-32 甲烷分布云图

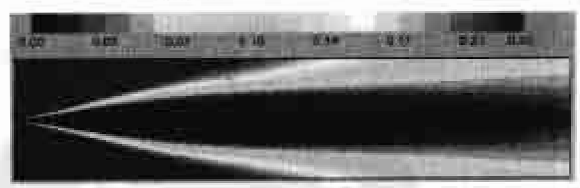


图 8-33 氧气分布云图



图 8-34 二氧化碳分布云图



图 8-35 水的分布云图

（18）图形分析完后，选择 File→Write

→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（8-1.cas 和 8-1.dat）。

（19）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

8.2 组分输运与化学反应模型概述

FLUENT 提供了多种模拟反应的模型，包括通用有限速率模型、非预混燃烧模型、预混燃烧模型、部分预混燃烧模型及 PDF 输运方程模型，下面分别进行介绍。

- 通用有限速率模型：是基于组分质量分数的输运方程解，利用预先定义的化学反应机制对化学反应进行模拟。反应速率在这种方法中以源项的形式出现在组分输运方程中，计算反应速度的方法有层流 Arrhenius 速度表达式计算、Magnussen 和 Hjertager 的漩涡耗散模型计算和 EDC 模型计算。通用有限速率模型应用范围最为广泛，可以模拟化学组分混合、输运和反应的问题，壁面或粒子表面反应问题等。
- 非预混燃烧模型：不是求解每个组分输运方程，而是求解一个或两个守恒标量（混合分数）的输运方程，然后从预测的混合分数分布推导出每一个组分的浓度。此方法主要用于模拟湍流扩散火焰。在守恒标量方法中，通过概率密度函数或者 PDF 来考虑湍流的影响。反应机理是使用 flame sheet 方法或者化学平衡计算来处理反应系统。层流火焰面 flamelet 模型是非预混燃烧模型的扩展，它考虑到了在化学平衡状态下形成的空气动力学的应力诱导分离。
- 预混燃烧模型：主要用于单一、完全预先混合好的燃烧系统。在这些问题中，完全的混合反应物和燃烧产物被火焰前缘分开，通过求解反应发展变量来预测火焰前缘的位置。湍流的影响则是通过考虑湍流火焰速度计算出来的。
- 部分预混燃烧模型：是描述非预混燃烧与完全预混燃烧结合的系统。通过结合混合分数方程和反应物发展变量来分别确定组分浓度和火焰前缘的位置。
- PDF 输运方程模型：结合 CHEMKIN 可以考虑详细的化学反应机理，而且高度的非线性化学反应项是精确模拟，无须封闭模型，可以合理地模拟湍流和详细化学反应动力学之间的相互作用。缺点是该方法需要消耗极大的计算机存储量和计算时间。

通用有限速率模型为最常用的模型，其计算反应速度的方法有以下几种，下面对其进行详细介绍。

（1）层流有限速率模型

层流有限速率模型使用 Arrhenius 公式计算化学源项，忽略了湍流脉动的影响。因此对于层流燃烧或化学反应相对缓慢的湍流燃烧是准确的，而对于高度非线性的湍流火焰一般是不精确的。

化学物质 i 的化学反应净源项通过其参加的 N_r 个化学反应的 Arrhenius 反应源的和计算得到：

$$R_i = M_{w,i}\sum_{i=1}^{N_r} R_{i,r} \tag{8-1}$$

式中：$M_{w,i}$ 为第 i 种物质的分子量；$R_{i,r}$ 为第 i 种物质在第 r 个反应中的产生/分解速率。

第 r 个反应可以表示成如下形式：

$$\sum_{i=1}^{N} v'_{i,r} M_i \underset{k_{b,r}}{\overset{k_{f,r}}{\longleftrightarrow}} \sum_{i=1}^{N} v''_{i,r} M_i \tag{8-2}$$

式中：N 为系统化学物质数目；$v'_{i,r}$ 为反应 r 中反应物 i 的化学计量系数；$v''_{i,r}$ 为反应 r 中生成物 i 的化学计量系数；M_i 为第 i 种物质的符号；$k_{f,r}$ 为反应 r 正向速率常数；$k_{b,r}$ 为反应 r 逆向速率常数。

反应 r 中物质 i 的产生/分解摩尔速度为：

$$\hat{R}_{i,r}=\Gamma\left(v''_{i,r}-v'_{i,r}\right)\left(k_{f,r}\prod_{j=1}^{N_r}\left[C_{j,r}\right]^{\eta'_{j,r}}-k_{b,r}\prod_{j=1}^{N_r}\left[C_{j,r}\right]^{\eta''_{j,r}}\right) \tag{8-3}$$

式中：N_r 为反应 r 的化学物质数目；$C_{j,r}$ 为反应 r 中每种反应物或生产物 j 的摩尔浓度；$\eta'_{j,r}$ 为反应 r 中每种反应物或生产物 j 的正向反应速度指数；$\eta''_{j,r}$ 为反应 r 中每种反应物或生产物 j 的逆向反应速度指数；Γ 为第三体对反应速度的净影响，默认状态为不包括。

反应 r 的正向速率常数 $k_{f,r}$，通过如下 Arrhenius 公式计算：

$$k_{f,r}=A_rT^{\beta_r}e^{-E_r/RT} \tag{8-4}$$

式中：A_r 为指数因子；β_r 为温度指数；E_r 为反应活化能，J/(kg·mol)；R 为气体常数，J/(kg·mol·K)。

在一般工程计算中，通常不考虑逆向反应，但是 FLUENT 中提供了设置逆向反应参数的选项，可以通过化学平衡常数的设置来计算逆向反应常数。

（2）涡耗散模型

大部分燃料都能快速燃烧，整体反应速率由湍流混合控制。在非预混火焰中，湍流缓慢地通过对流/混合燃料和氧化剂进入反应区，在反应区内快速地燃烧。而在预混火焰中，湍流对流/混合冷的反应物和热的生成物进入反应区，在反应区迅速地发生反应。在这些情况下，燃烧称为混合限制的，即扩散控制的燃烧，可以忽略复杂而未知的化学反应动力学速率。

FLUENT 提供的湍流-化学反应相互作用模型称为涡耗散模型。反应 r 中物质 i 的产生速率 $R_{i,r}$ 由下式给出：

$$R_{i,r}=\min\left\{v'_{i,r}M_{w,i}A\rho\frac{\varepsilon}{k}\min_{R}\left(\frac{Y_R}{v'_{R,r}M_{w,R}}\right),v'_{i,r}M_{w,i}\mathrm{AB}\rho\frac{\varepsilon}{k}\frac{\sum_P Y_P}{\sum_j^N v''_{j,r}M_{w,j}}\right\} \tag{8-5}$$

式中：Y_P 是任何一种产物的质量组分；Y_R 是某种产物的质量组分；A、B 为经验常数，分别取 4.0 和 0.5。

在式（8-5）中，化学反应速率由大尺度涡混合时间尺度 k/ε 控制。只要湍流出现（$k/\varepsilon>0$），燃烧即可进行，不需要点燃火源来启动燃烧。这通常对于非预混火焰是可以接受的，因为此时往往是扩散控制化学反应速率。但在预混火焰中，如果仅使用涡耗散模型就不是很合理了，因为此时化学动力学因素也在控制着反应。为了修正这一点，FLUENT 提供了有限速率/涡耗散模型，其中式（8-1）的 Arrhenius 反应速率和式（8-5）的涡耗散反应速率都进行计算。净反应速率取两个速率中较小的。实际上，Arrhenius 反应速率作为一种动力学开关，用于阻止反应在火焰稳定之前发生。一旦火焰被点燃，涡耗散速率通常会小于 Arrhenius 反应速率，并且反应是混合限制（扩散控制燃烧）的。

尽管 FLUENT 允许采用涡耗散模型和有限速率/涡耗散模型的多步反应机理（反应数>2），但可能会产生不正确的结果。原因是多步反应机理基于 Arrhenius 速率，每个反应的具体参数都不一样。在涡耗散模型中，每个反应都有同样的湍流速率，因而模型只能用于单步（反应物-产

物）或双步（反应物-中间产物、中间产物-产物）总包反应。模型不能预测化学动力学控制的物质，如自由基。如果希望考虑湍流流动中的多步化学动力学机理，可以使用 EDC 模型。

涡耗散模型需要产物来启动反应。当初始化求解时，FLUENT 设置产物的质量百分数为 0.01，通常足够启动反应。在湍流模型选用大涡模拟时，涡耗散模型中的时间尺度将被亚格子混合速率时间尺度所代替。

（3）EDC 模型

EDC（涡-耗散-概念）模型是涡耗散模型的扩展，在湍流流动结构中包含详细的化学反应机理。该模型假设化学反应都发生在小涡中，称为精细涡，而反应的时间是由精细涡及化学反应本身需要的时间来共同控制的。

小涡的空间分辨率为：

$$\xi^{*}=C_{\xi}\left(\frac{\upsilon\varepsilon}{k^{2}}\right)^{3/4} \tag{8-6}$$

式中：C_{ξ} 为容积比率常数，取 2.1377。

化学组分在 t^{*} 时间内发生化学反应，t^{*} 的表达式为：

$$t^{*}=C_{t}\left(\frac{\upsilon}{\varepsilon}\right)^{1/2} \tag{8-7}$$

式中：C_{t} 为时间尺度常数，取 0.4082。

组分守恒方程中的化学反应源项为：

$$R_{i}=\frac{\rho\left(\xi^{*}\right)^{2}}{\tau^{*}\left[1-\left(\xi^{*}\right)^{3}\right]}\left(Y_{i}^{*}-Y_{i}\right) \tag{8-8}$$

式中：Y^{*} 为精细涡的时间尺度；τ^{*} 为化学反应之后的组分质量分数；Y 为同样的物质在反应前的浓度。

EDC 模型能够在湍流反应流动中考虑详细的化学反应机理，但消耗的内存与时间较大，所以通常在快速化学反应假定无效的情况下才使用该模型，如快速熄灭火焰中缓慢的 CO 烧尽、选择性非催化还原中的 NO 转化等问题。

8.3 组分输运与化学反应模型设置

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch8\8-3.avi 文件。

选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，双击 Models 面板中的 Species-Off 选项，弹出如图 8-36 所示的 Species Model 对话框，选中 Model 栏中的 Species Transport 单选按钮，即启动了组分输运模型。在 Reactions 栏中选中 Volumetric 复选框，即启用了反应模型。

Species Model 对话框中的 Mixture Material 下拉列表框中为待选混合物，包括了目前 FLUENT 数据库中定义的所有混合物，用户选择混合物后，可通过单击 Edit 按钮，检查混合物的特性。若 Mixture Material 下拉列表框中不存在用户希望模拟的混合物，可选择 Mixture-template 选项，然后单击 Edit 按钮，弹出如图 8-37 所示的 Edit Material 对话框，可对混合物的物

性参数进行设置。若想更改混合物组分，则需要单击 Edit 按钮，弹出 Species 对话框，如图 8-38 所示，Selected Species 列表框中为已选择的混合物组分，Selected Solid Species 列表框中则显示了混合物中所有的凝聚固体组分，Selected Site Species 列表框中将显示所有的现场组分（当用户模拟壁面表面化学反应时，现场组分是被吸收到壁面边界上的组分），Available Materials 列表框中为可以添加到混合物中的待选组分（用户还可通过 Create/Edit Materials 对话框调入更多的待选组分）。Add 和 Remove 按钮用于组分的添加和移除。

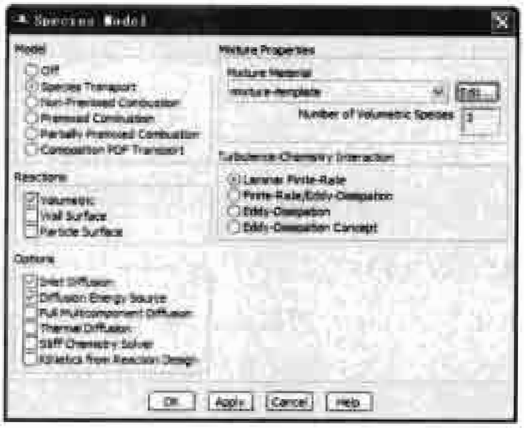


图 8-36　Species Model 对话框

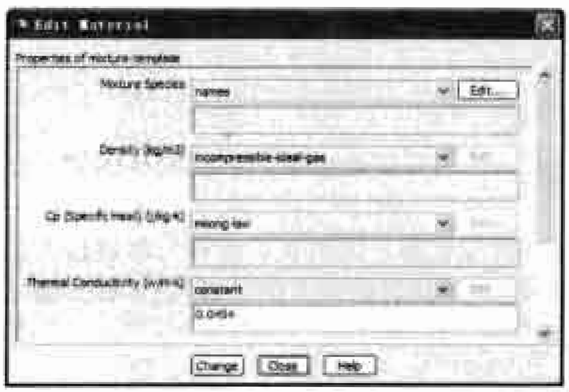


图 8-37　Edit Material 对话框

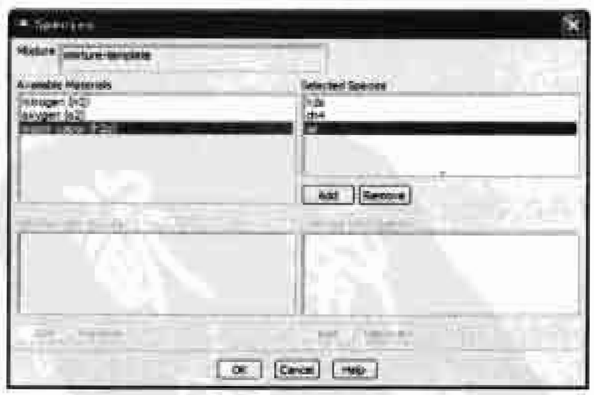


图 8-38　Species 对话框

提示：Selected Species 列表框中组分的顺序十分重要。当从混合物中添加和移除组分时，应将含量最高的组分（根据质量）排列在最下方，由下至上含量依次递减。

改变组分后，单击 OK 按钮回到 Edit Material 对话框，需要单击 Change 按钮，以实现组分的更新，最后回到 Species Model 对话框，此时 Number of Volumetric Species 数据输入框中即会显示当前混合物中体积组分的数量。

Species Model 对话框的 Turbulence-Chemistry Interaction 栏中有 4 个模型。

- Laminar Finite-Rate：只计算阿累尼乌斯速率，忽略湍流和化学反应的相互作用。
- Finite-Rate/Eddy-Dissipation：既计算阿累尼乌斯速率，也计算混合速率，并使用两者中的较小值，适用于湍流流动。

- Eddy-Dissipation：只计算湍流混合速率，适用于湍流流动。
- Eddy-Dissipation Concept：使用细致的化学反应机制对湍流和化学反应相互作用建模，适用于湍流流动。

Species Model 对话框中 Options 栏中的 Full Multicomponent Diffusion 和 Thermal Diffusion 复选框在模拟完全多组分扩散和热扩散问题时才选中。对于层流化学反应，选中 Options 栏中的 KINetics from Reaction Design 复选框，就允许用户使用来自 Reaction Design 的化学反应速率应用和求解方法，该算法基于 CHEMKIN 技术，并与之相容。

如果问题中涉及化学反应，还需要用户定义所设置组分的化学反应机制。在 Edit Material 对话框中 Reaction 的右侧单击 Edit 按钮，弹出如图 8-39 所示的 Reactions 对话框。Total Number of Reactions 数据输入框中可以设置反应的个数，如果用户计算问题中包括了离散相燃烧颗粒，则只有在对表面燃烧使用多表面化学反应模型时，才应当在化学反应总数中包括微粒表面化学反应。Reaction Name 文本输入框中可输入便于记忆的化学反应名称。对于流体相化学反应，则保留 Reaction Type 为 Volumetric，若为壁面表面化学反应或微粒表面化学反应，则选择 Reaction Type 为 Wall Surface 或 Particle Surface。Number of Reactants 和 Number of Products 分别为化学反应中涉及的反应物和产物的数量，可以通过微调框改变其数值大小。Species 下方为反应物或产物组分，Stoich.Coefficient 和 Rate Exponent 分别为化学当量系数和速率指数。对于正向化学反应，产物组分通常不影响正向反应速率，此时产物的速率指数都为 0；而对于可逆化学反应，可将产物速率指数设置成需要的值。如果用户使用了层流有限速率、有限速率/涡耗散或 EDC 模型，在 Arrhenius Rate 栏中输入阿累尼乌斯反应速率的相关参数。如果希望在化学反应速率中包括第三体的影响，并且有该效率因子的准确数据，则选中 Third-Body Efficiencies 复选框，并单击其后的 Specify 按钮，可以在 Third-Body Efficiencies 对话框中设置第三体效率因子。如果用户没有准确的第三体效率因子参数，则不必激活 Third-Body Efficiencies 选项。

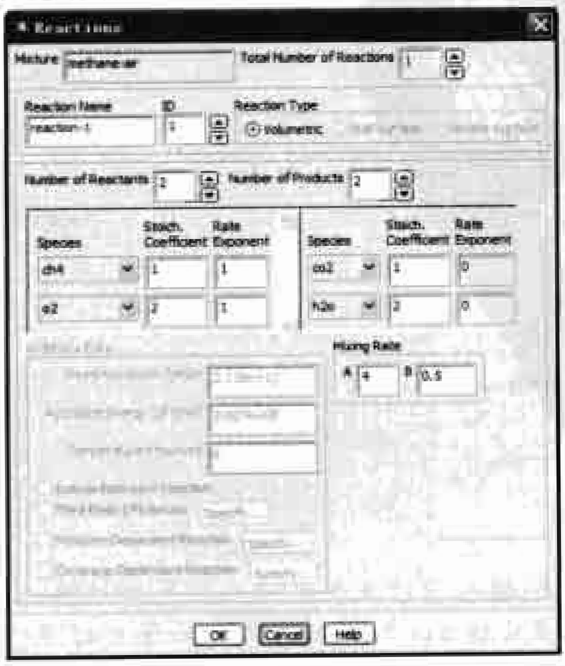


图 8-39 Reactions 对话框

8.4 实例·操作——输气管路泄漏扩散

天然气管道由于腐蚀老化、管材缺陷、第三方破坏、误操作和施工缺陷等原因，常发生泄漏、破裂和燃烧爆炸等事故，严重威胁管道周围环境和人员的安全，并可能造成巨大的经济损失，如图 8-40 所示。随着输气管道向大口径、高压的方向发展，管道泄漏和爆裂的危险随之增加，对天然气泄漏扩散规律的深入研究已刻不容缓。本例针对山坡输气管道的泄漏进行模拟，具体计算区域尺寸如图 8-41 所示，天然气管道铺置在山坡，山坡倾角 45°，泄漏口为 10cm，泄漏方向与水平方向的夹角为 15°，左侧风速为 10m/s。



图 8-40 泄漏后的燃烧爆炸

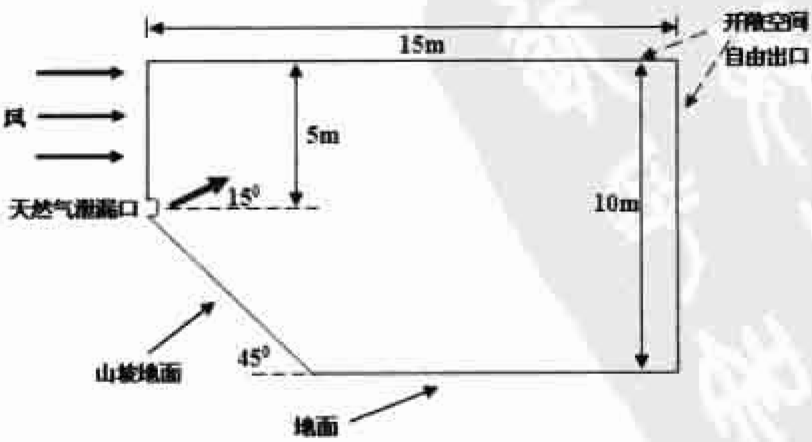


图 8-41 计算区域尺寸

【思路分析】

由于本例为泄漏扩散问题，不涉及化学反应，因此只需选择组分输运模型（Species Transport），而不启动化学反应模型。具体的操作流程如图 8-42 所示。

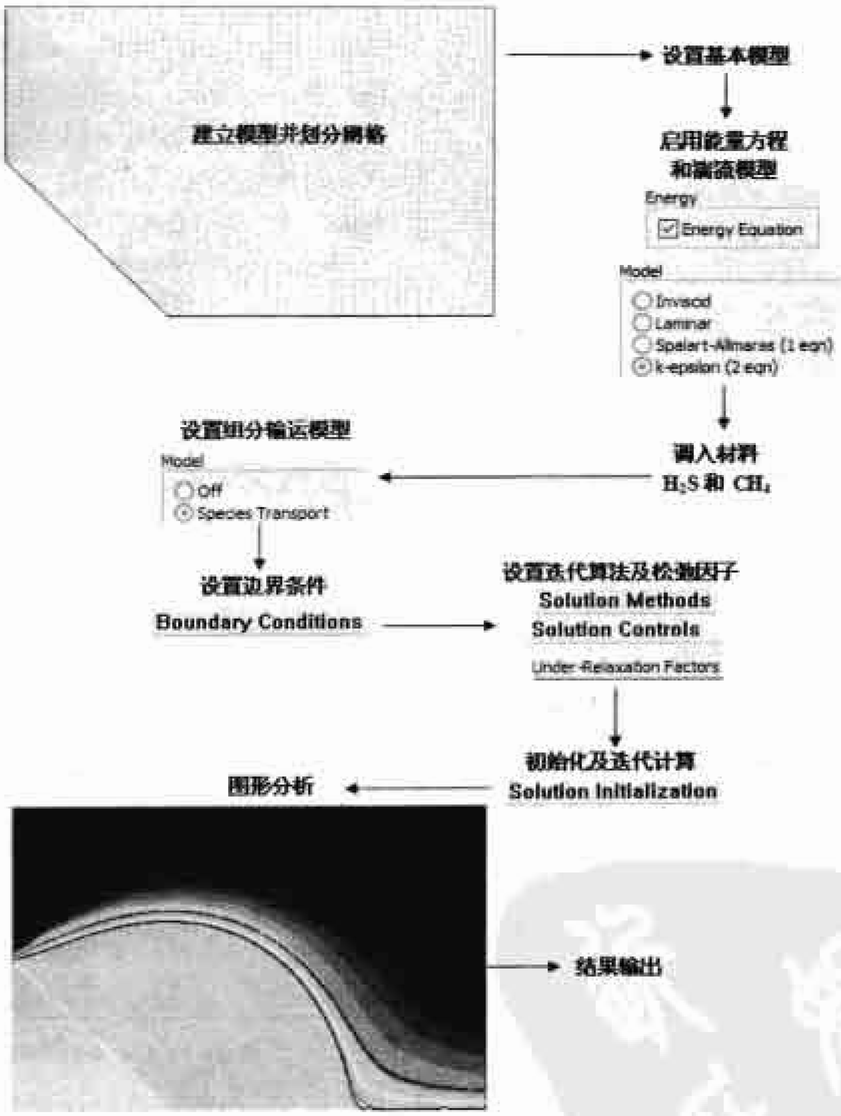


图 8-42　输气管路泄漏扩散模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch8\8-4.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch8\8-4.cas，8-4.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch8\8-4.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器，如图 8-43 所示。

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 8-4.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，网格加载如图 8-44 所示。

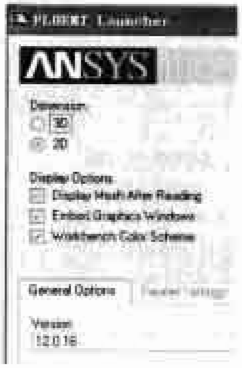


图 8-43　启动 2D 解算器

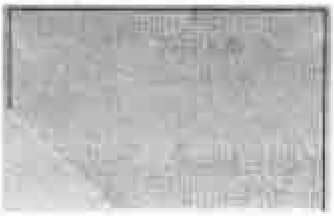


图 8-44　网格

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在展开的面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，如图 8-45 所示，对话框中显示了模型的尺寸范围，这里无须改动，单击 Close 按钮，关闭对话框。

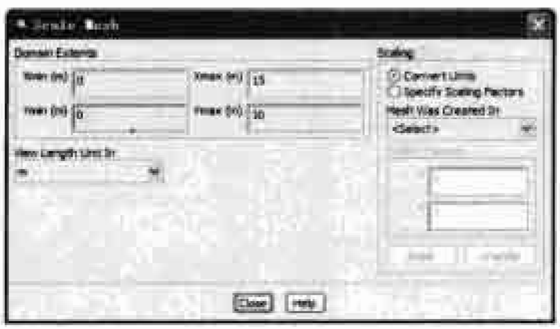


图 8-45　Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）在 General 面板的 Solver 栏中进行基本模型设置，本例保持默认设置。

（6）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，在展开的面板中双击 Energy-Off 选项，弹出 Energy 对话框，如图 8-46 所示，选中 Energy Equation 复选框，启动能量方程计算，单击 OK 按钮。然后回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框，如图 8-47 所示，选中 k-epsilon (2 eqn)单选按钮，并选择 k-epsilon Model 为 Standard，单击 OK 按钮。



图 8-46　Energy 对话框

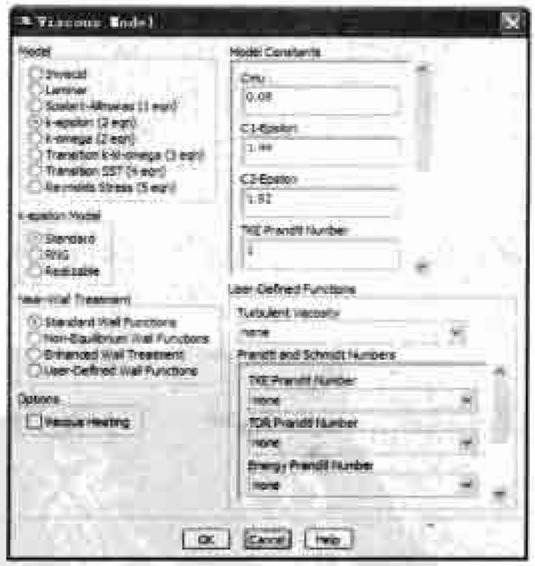


图 8-47　Viscous Model 对话框

（7）启动组分输运模型。双击 Models 面板中的 Species-Off 选项，弹出如图 8-48 所示的 Species Model 对话框，选中 Model 栏中的 Species Transport 单选按钮。在 Mixture Material 下拉列表框中选择 mixture-template 选项，单击 OK 按钮。

（8）选择 Problem Setup 下的 Materials 选项，在展开的面板中单击 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，选择 Material Type 为 fluid，单击 FLUENT Database 按钮，弹出如图 8-49 所示的 FLUENT Database Materials 对话框，在 FLUENT Fluid Materials 列表框中选择 hydrogen-sulfide(h2s)和 methane 选

项，单击 Copy 按钮，将两种材料调入到当前工程中。连续单击两次 Close 按钮，分别退出 FLUENT Database Materials 对话框和 Create/Edit Materials 对话框。

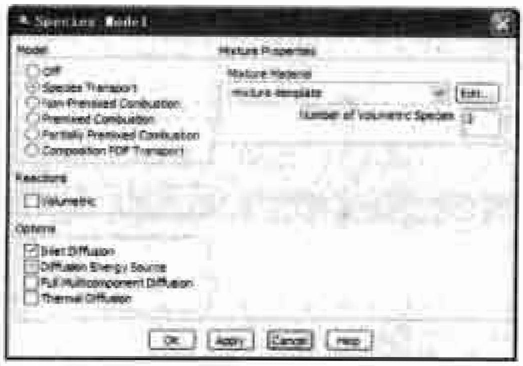


图 8-48　Species Model 对话框



图 8-49　调用硫化氢和甲烷材料

（9）双击 Models 面板的 Species-Species Transport 选项，回到 Species Model 对话框，单击 Edit 按钮，弹出如图 8-50 所示的 Edit Material 对话框。在该对话框中单击 Edit 按钮，弹出如图 8-51 所示的 Species 对话框，其中的 Selected Species 列表框中为已选组分列表，从上到下依次设置为硫化氢、甲烷和空气，单击 OK 按钮。回到 Edit Material 对话框，单击 Change 按钮。最后，回到 Species Model 对话框，单击 OK 按钮，即完成本例组分输运模型的设置。

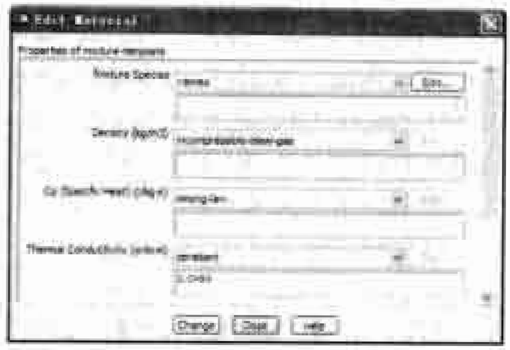


图 8-50　Edit Material 对话框

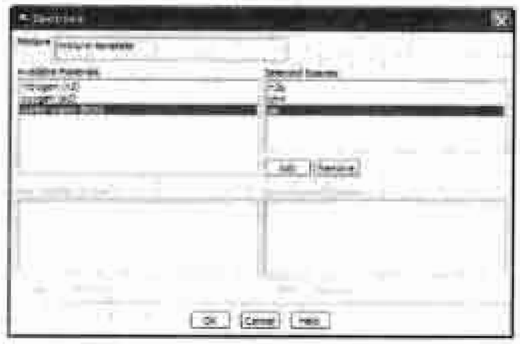


图 8-51　Species 对话框

（10）单击 Cell Zone Conditions 面板右下角的 Operating Conditions 按钮，弹出操作环境设置对话框，这里保持默认，单击 OK 按钮。

（11）定义本例的边界条件。选择 Problem Setup 中的 Boundary Conditions 选项，在 Boundary Conditions 面板中选择 inlet 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，如图 8-52 所示，设置其 Velocity Specification Method 为 Components，分别设置 X-Velocity (m/s)和 Y-Velocity(m/s)为 303.04 和 81.2，表示泄漏倾角为 15°，并选择其湍流方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity(%) 为 10、Hydraulic Diameter(m) 为 0.1。然后选择 Thermal 选项卡，设置泄漏口温度为 300K。接着选择 Species 选项卡，设置泄漏口的组分，如图 8-53 所示，设置 h2s 和 ch4 分别为 0.029 和 0.971，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，选择 out-left 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 8-54 所示的对话框，设置 Velocity Magnitude(m/s)

为 10，同样选择其湍流方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity(%)为 10、Hydraulic Diameter(m)为 4.9。然后选择 Thermal 选项卡，设置其进口温度也为 300K。接着选择 Species 选项卡，如图 8-55 所示，保持 h2s 和 ch4 均为 0，单击 OK 按钮。再次回到 Boundary Conditions 面板，选择 top 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 8-56 所示的 Pressure Outlet 对话框，保持总压为 0，选择其湍流方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Backflow Turbulent Intensity(%)为 10、Backflow Hydraulic Diameter(m)为 15，其温度与组分定义同 out-left 边界。按照同样的方法可设置右侧出口边界（out-right），如图 8-57 所示。

（12）边界定义完后，选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，保持默认的算法设置。选择面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置。

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在展开的面板中选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 8-58 所示的对话框，设置 energy 的精度为 1e-06，其余项的收敛精度均为 0.001，单击 OK 按钮。

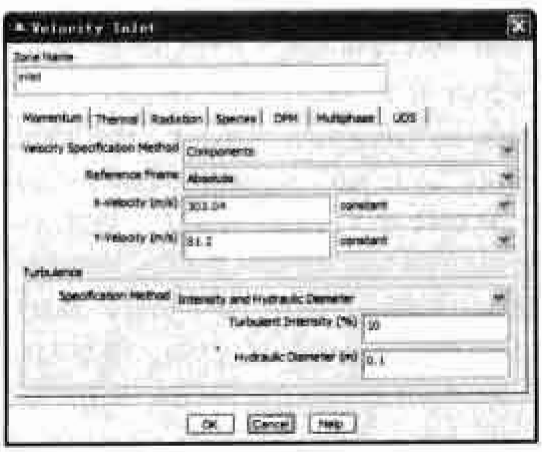


图 8-52　泄漏口速度设置



图 8-53　泄漏口组分设置

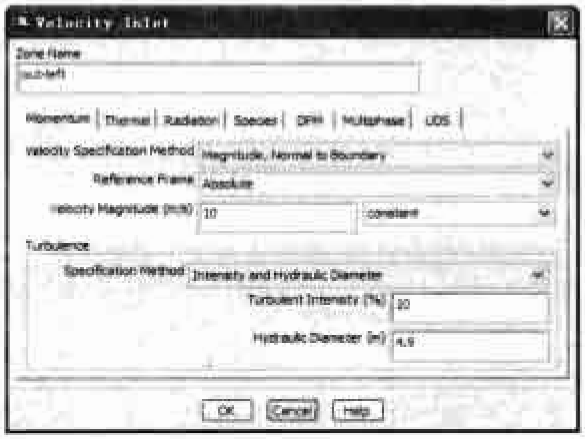


图 8-54　风进口速度设置

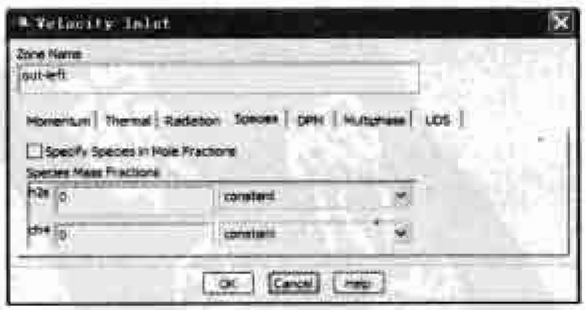


图 8-55　风进口组分设置

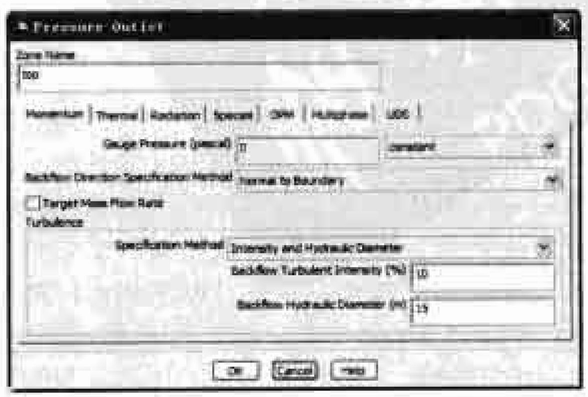


图 8-56　上出口压强设置

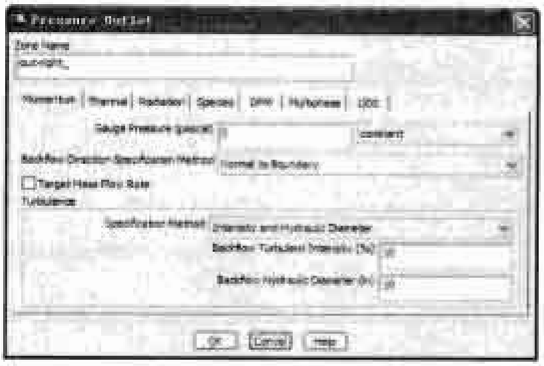


图 8-57　右出口压强设置

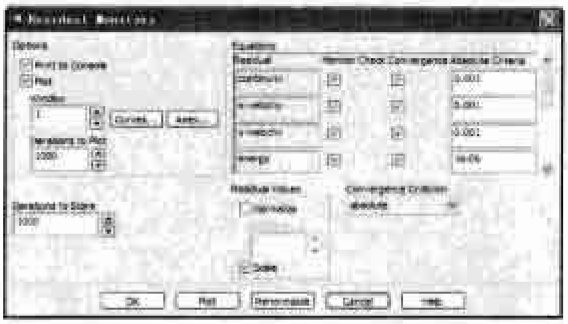


图 8-58　收敛精度设置

（14）选择 Solution Initialization 面板中的 Compute from 为 inlet，如图 8-59 所示，单击 Initialize 按钮，完成计算初始化。

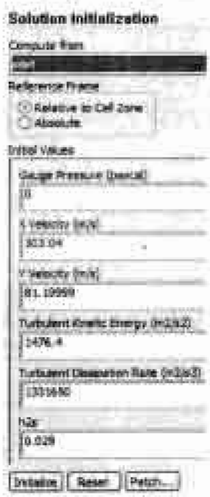


图 8-59　初始化

（15）选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，设置 Number of Iterations 为 500，单击 Calculate 按钮，计算结束后的残差曲线如图 8-60 所示。

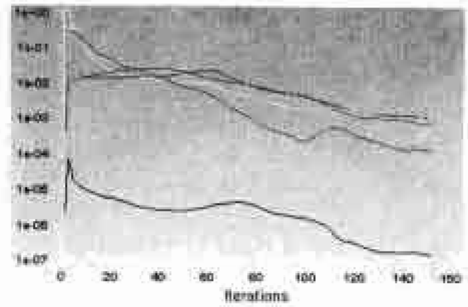


图 8-60　残差曲线

（16）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的面板中双击 Contours 选项，弹出 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Velocity...和 Velocity Magnitude 选项，单击 Display 按钮，可得到如图 8-61 所示的速度云图。若在 Contours of 栏中选择 Species...和 Mass fraction of h2s 选项，单击 Display 按钮，可得到此时的硫化氢浓度分布云图，如图 8-62 所示。若将 Mass fraction of h2s 改为 Mass fraction of ch4，单击 Display 按钮，可得到如图 8-63 所示的甲烷浓度分布云图。



图 8-61　速度云图

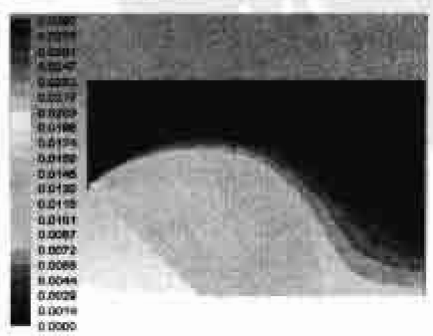


图 8-62　硫化氢浓度分布云图

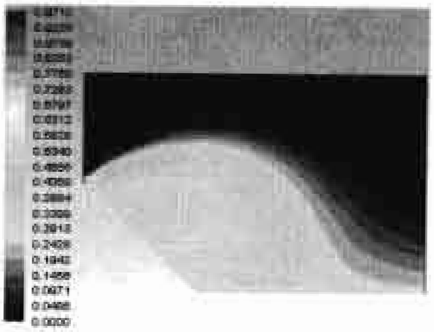


图 8-63　甲烷浓度分布云图

（17）双击 Graphics and Animations 面板中的 Pathlines 选项，弹出如图 8-64 所示的 Pathlines 对话框，设置 Step Size(m)为 0.05、Steps 为 1000，并选择 Release from Surfaces 为 inlet，单击 Display 按钮，得到由泄漏口喷射出来的气体的迹线，如图 8-65 所示。

（18）图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（8-4.cas 和 8-4.dat）。

（19）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

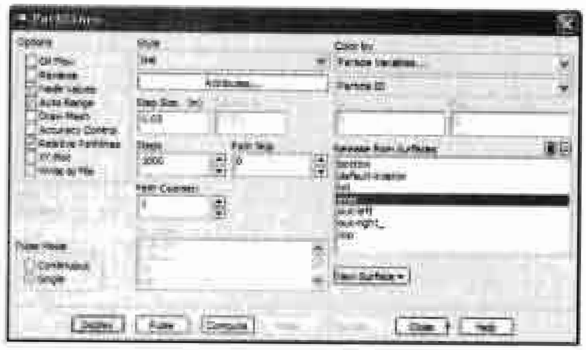


图 8-64　Pathlines 对话框

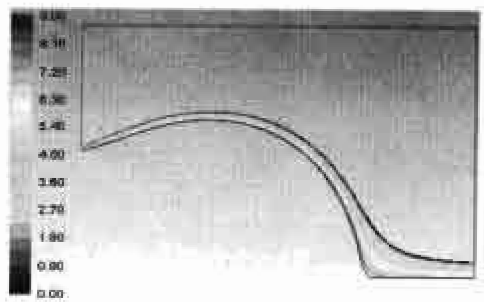


图 8-65　迹线

8.5　实例·练习——液体燃料燃烧

石油化工行业中经常涉及液体燃料燃烧问题，如裂解炉、燃烧器等，如图 8-66 所示，在燃烧室内液体燃料能否完全燃烧、其进口速度如何控制、燃烧后的产物是否有毒、对人体是否构成威胁，这些都是工程实际中关注的问题。

因此，本例利用组分输运与化学反应模型，对戊烷的燃烧进行模拟，其计算区域尺寸如图 8-67 所示。



图 8-66　燃烧问题

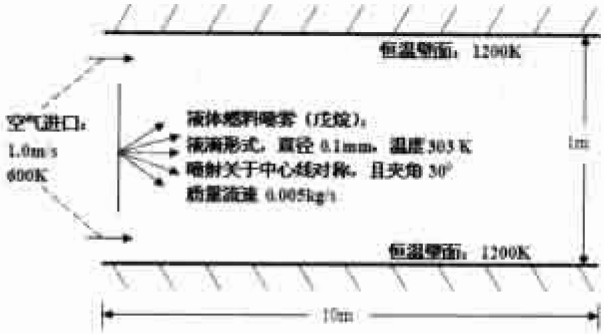


图 8-67 燃料燃烧计算区域尺寸

【思路分析】

本例为对称问题，故只需建立一般模型，并设置对称边界。燃烧用混合分数/PDF 方法来模拟，并且采用平衡的混合化学组分，液体燃料喷射采用离散相模型。整个模拟过程如图 8-68 所示。



图 8-68 液体燃料燃烧模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch8\8-5.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch8\8-5.cas，8-5.dat，8-5.pdf 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch8\8-5.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器。

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 8-5.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，网格加载如图 8-69 所示。



图 8-69　网格

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在打开的面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，如图 8-70 所示，对话框中显示了模型的尺寸范围，这里无须改动，单击 Close 按钮，关闭对话框。

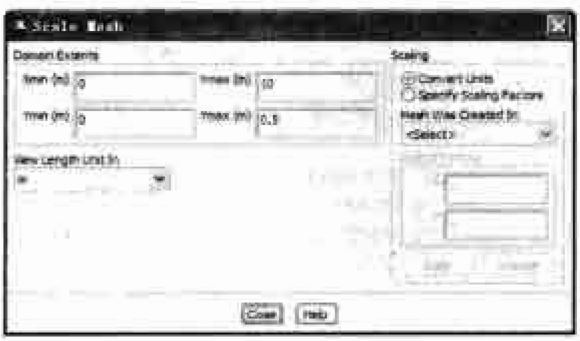


图 8-70　Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）在 General 面板的 Solver 栏中进行基本模型设置，本例保持默认。

（6）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，在展开的面板中双击 Energy-Off 选项，弹出 Energy 对话框，如图 8-71 所示，选中 Energy Equation 复选框，启动能量方程计算，单击 OK 按钮。然后回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框，如图 8-72 所示，选中 k-epsilon (2 eqn)单选按钮，并选择 k-epsilon Model 为 Standard，保持其他默认设置，单击 OK 按钮。



图 8-71　Energy 对话框

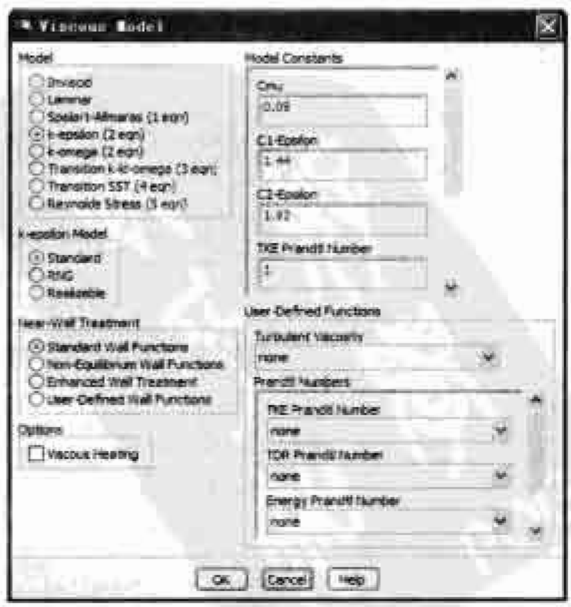


图 8-72　Viscous Model 对话框

（7）启动本例的组分输运与化学反应模型，双击 Models 面板中的 Species-Off 选项，弹出如图 8-73 所示的 Species Model 对话框，选中 Model 栏中的 Non-Premixed Combustion

单选按钮，并选中 PDF Options 栏中的 Inlet Diffusion 复选框。在 Chemistry 选项卡中的 Energy Treatment 栏中选中 Non-Adiabatic（非绝热壁）单选按钮，保持 Operating Pressure (pascal)和 Fuel Stream Rich Flamability Limit 为 101325 和 0.1。然后选择 PDF Table Creation 中的 Boundary 选项卡，如图 8-74 所示，在 Boundary Species 栏中输入“c5h12”，单击 Add 按钮。在 Specify Species in 栏中选中 Mole Fraction 单选按钮。接着在 n2 和 o2 的 Oxid 列中输入“0.78992”和“0.21008”，在 c5h12 的 Fuel 列中输入“1”。在 Temperature 栏中设置 Fuel(K)为 303、Oxid(K)为 600。选择 PDF Table Creation 中的 Table 选项卡，如图 8-75 所示，设置 Minimum Temperature(k)为 280，保持其他默认参数，单击 Calculate PDF Table 按钮，文本界面中出现计算信息，如图 8-76 所示，选择 File→Write→PDF 命令，将 PDF 文件保存为 8-5.pdf。单击 Apply 按钮。

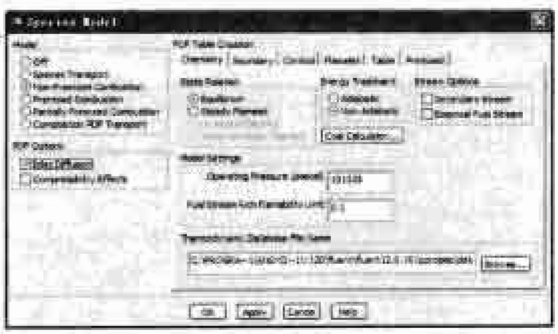


图 8-73 Species Model 对话框

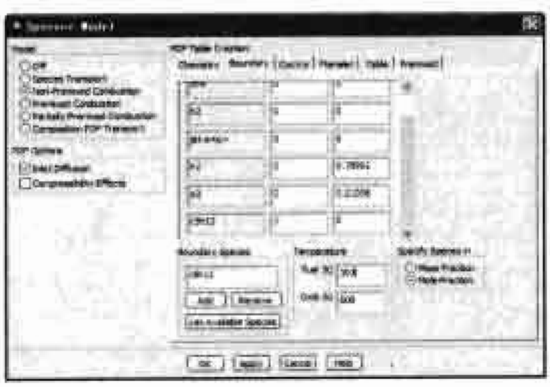


图 8-74 PDF Boundary 设置

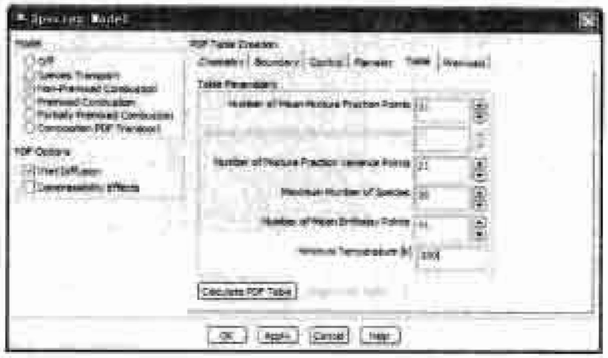


图 8-75 PDF Table 设置

```
Generating PDF lookup table
Type of the PDF Table: Nonadiabatic Table (Two Streams)
Calculating table .....
     calculating temperature limits .....
     calculating enthalpy slices .....
Performing PDF integrations.....

26691  points calculated
20  species added
PDF Table successfully generated!
```

图 8-76 PDF Table 计算信息显示

（8）在 Species Model 对话框中单击 Display PDF Table 按钮，弹出如图 8-77 所示的 PDF Table 对话框，在 Plot Variable 下拉列表框中选择 Mean Temperature(K)选项，单击 Display 按钮，得到如图 8-78 所示的非绝热温度分布。然后，在 Plot Variable 下拉列表框中选择 Mole Fraction of c5h12 选项，如图 8-79 所示，在 Plot Type 栏中选中 2D Curve on 3D Surface 单选按钮，单击 Plot 按钮得到如图 8-80 所示的戊烷的瞬时摩尔分数。采用同样的方法，可以得到如图 8-81 所示的一氧化碳的瞬时摩尔分数。

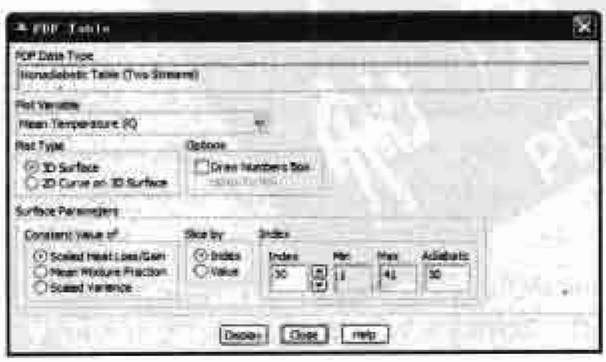


图 8-77 PDF Table 对话框

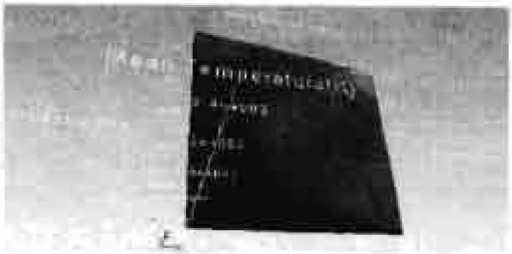


图 8-78　非绝热温度显示

（9）双击 Models 面板中的 Discrete Phase-Off 选项，弹出如图 8-82 所示的 Discrete Phase Model 对话框，选中 Interaction with Continuous Phase 复选框，并设置 Number of Continuous Phase Iterations per DPM Iteration 为 5。改变 Tracking Parameters 栏中的 Max.Number of Steps 为 1000，并选中 Specify Length Scale 复选框，保持其 Length Scale(m) 为 0.01。然后单击 Injections...按钮，弹出 Injections 对话框，单击其中的 Create 按钮，弹出如图 8-83 所示的 Set Injection Properties 对话框。在 Injection Type 下拉列表框中选择 group 选项，设置 Number of Particle Streams 为 10，选择 Particle Type 为 Droplet，在 Material 下拉列表框中选择 n-pentane-liquid 选项，并选择 Evaporating Species 为 c5h12。在 Point Properties 选项卡中设置 First Point 栏中的 X-Position(m) 为 0.001、Y-Position(m) 为 0.001、X-Velocity(m/s) 为 100、Y-Velocity(m/s) 为 0、Diameter(m) 为 1e-04、Temperature(k) 为 303、Flow Rate(kg/s) 为 2.5e-04。在 Last Point 栏中设置 Y-Velocity (m/s) 为 57.7，其余同 First Point 的设置。然后选择 Turbulent Dispersion 选项卡，如图 8-84 所示，选中 Discrete Random Walk Model 复选框，并设置 Number of Tries 为 10，单击 OK 按钮。回到 Injections 对话框，可以看到 Injections 列表框中已经存在定义好的射流源，默认的名字为 injection-0，单击 Close 按钮关闭该对话框。回到 Discrete Phase Model 对话框，单击 OK 按钮，完成本例离散相液滴射流源的设置。

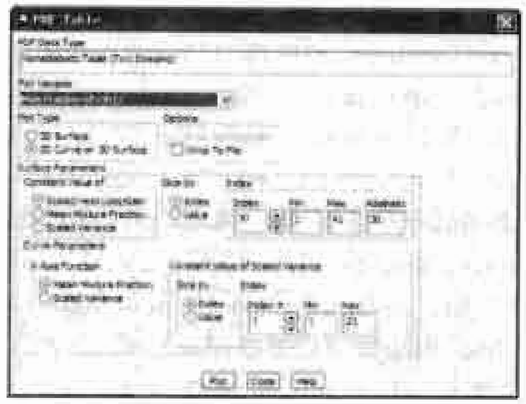


图 8-79　组分/混合分数检查设置

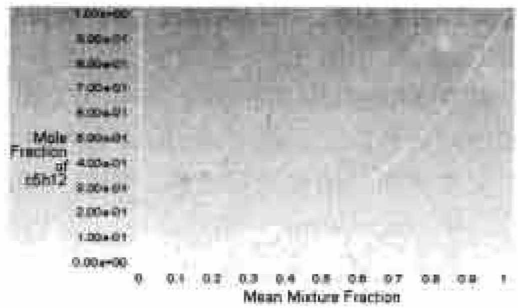


图 8-80　戊烷的瞬时摩尔分数

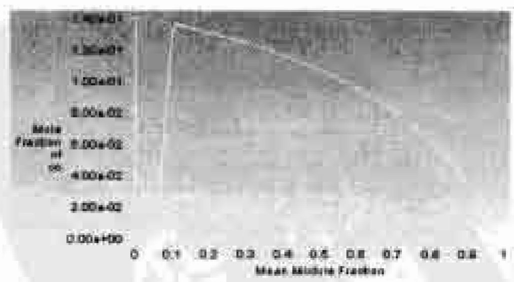


图 8-81　一氧化碳的瞬时摩尔分数

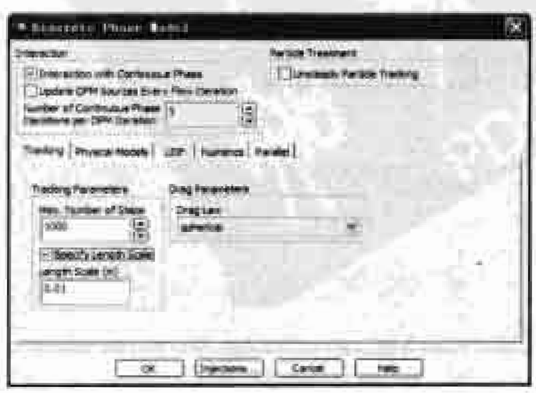


图 8-82　Discrete Phase Model 对话框

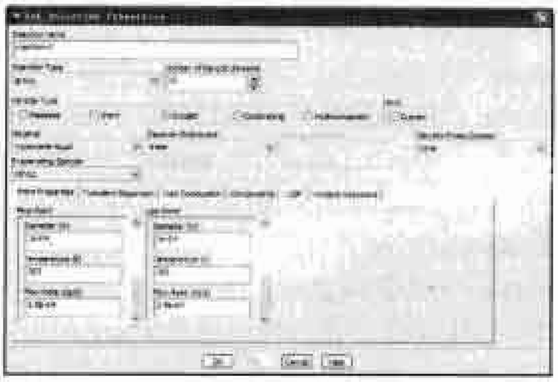


图 8-83　Set Injection Properties 对话框

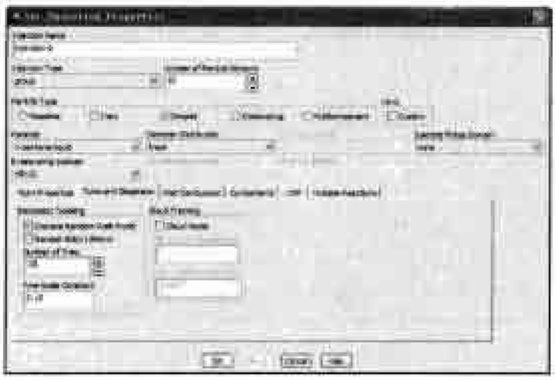


图 8-84　湍流设置

（10）单击 Materials 面板中的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，如图 8-85 所示，选择 Material Type 为 droplet-particle，更改 n-pentane-liquid 的物性参数，将 Density(kg/m3)改为 620、Cp(Specific Heat)(j/kg-k) 改为 2300、Latent Heat (j/kg) 改为 363000、Vaporization Temperature(k)改为 303、Boiling Point(k)改为 306、Volatile Component Fraction(%)改为 100、Binary Diffusivity(m2/s)改为 6.1e-06、Saturation Vapor Pressure(pascal)改为 81000，单击 Change/Create 按钮，关闭 Create/Edit Materials 对话框。

（11）单击 Cell Zone Conditions 面板右下角的 Operating Conditions 按钮，弹出操作环境设置对话框，这里保持默认，单击 OK 按钮。

（12）定义本例的边界条件。选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，在 Boundary Conditions 面板中选择 in 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，如图 8-86 所示，设置 Velocity Magnitude(m/s)为 1，并选择其湍流方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity(%)为 10、Hydraulic Diameter(m)为 2。然后选择 Thermal 选项卡，设置进口温度为 600K，如图 8-87 所示，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，选择 out 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 8-88 所示的对话框，保持总压为 0，选择其湍流方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Backflow Turbulent Intensity(%)为 10、Backflow Hydraulic Diameter(m)为 2。然后选择 Thermal 选项卡，设置出口温度为 1800K，单击 OK 按钮。重新回到 Boundary Conditions 面板，选择 wall 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 8-89 所示的 Wall 对话框，选择 Thermal 选项卡，设置其为定温边界，温度为 300K，选择 DPM 选项卡，如图 8-90 所示，设置 Boundary Cond.Type 为 trap，单击 OK 按钮。

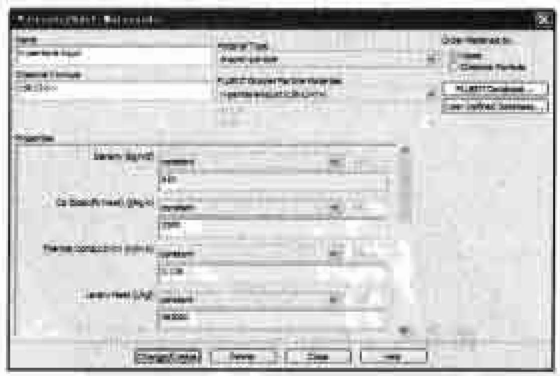


图 8-85　Create/Edit Materials 对话框

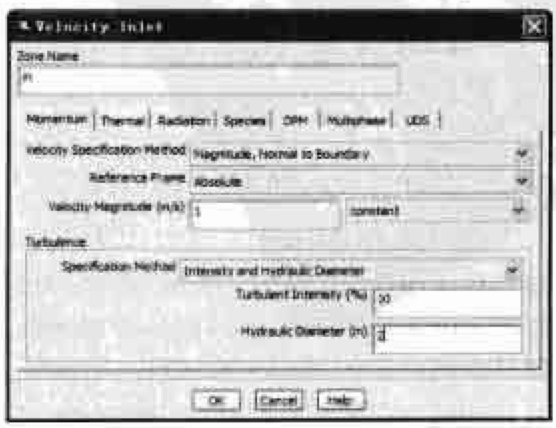


图 8-86　进口速度设置



图 8-87　进口温度设置

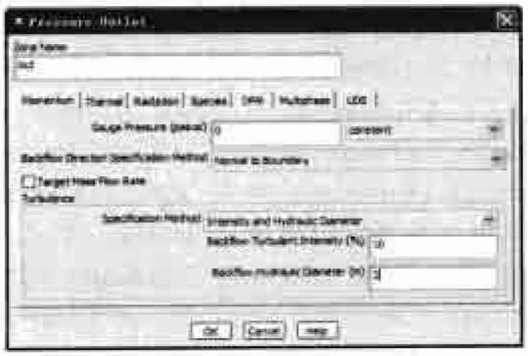


图 8-88　出口压强设置

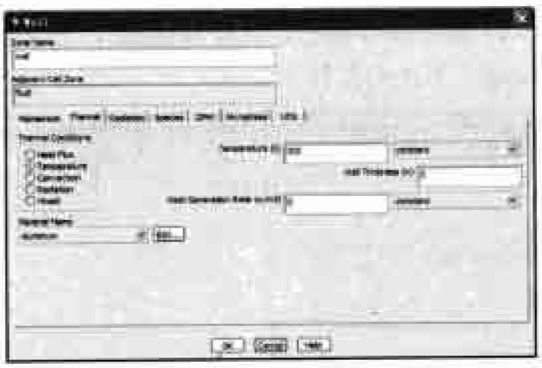


图 8-89　壁面温度设置

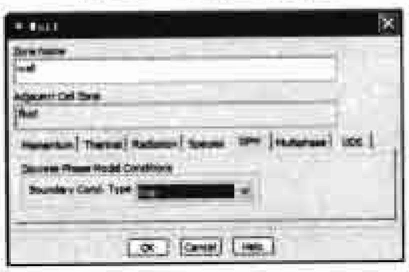


图 8-90　壁面 DPM 边界条件设置

（13）边界定义完后，首先计算无反应的稳态气流流场，在 Discrete Phase Model 对话框中设置 Number of Continuous Phase Iterations per DPM Iteration 为 0，单击 OK 按钮。

（14）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，保持默认算法设置。选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置。

（15）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在展开的面板中选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 8-91 所示的对话框，设置 energy 的精度为 1e-06，其余项的收敛精度均为 0.001，单击 OK 按钮。

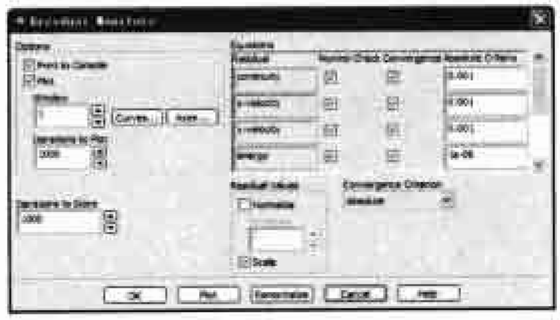


图 8-91　收敛精度设置

（16）选择 Solution Initialization 面板中的 Compute from 为 in，如图 8-92 所示，单击 Initialize 按钮。

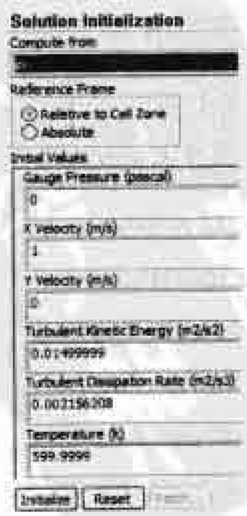


图 8-92　初始化

（17）选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 8-93 所示的面板中设置 Number of Iterations 为 200，单击 Calculate

按钮开始计算。计算结束后的残差曲线如图 8-94 所示。

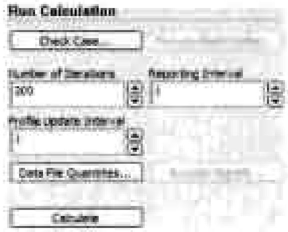


图 8-93　迭代设置

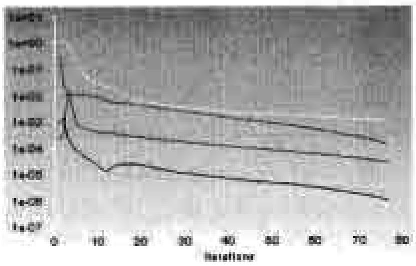


图 8-94　残差曲线

（18）无反应的稳态气流流场得到后，在 Discrete Phase Model 对话框中设置 Number of Continuous Phase Iterations per DPM Iteration 为 5，并选中 Update DPM Source Every Flow Iteration 复选框，单击 OK 按钮。

（19）再次选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 8-95 所示的面板中设置 Number of Iterations 为 500，单击 Calculate 按钮开始计算。计算结束后的残差曲线如图 8-96 所示。

（20）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在面板右下角单击 Views 按钮，弹出 Views 对话框，设置 Mirror Planes 为 duichen，单击 Apply 按钮。

（21）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的面板中双击 Contours 选项，弹出 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Temperature...和 Static Temperature 选项，单击 Display 按钮，可得到如图 8-97 所示的温度云图。若在 Contours of 栏中选择 Pdf...和 Mean Mixture Fraction 选项，单击 Display 按钮，可得到如图 8-98 所示的混合分数分布云图。改变 Contours of 栏中的选项为 Discrete Phase Model...和 DPM Evaporation/Devolatilization，单击 Display 按钮，可得到喷雾速率云图，如图 8-99 所示。若在 Contours of 栏中选择 Species...和 Mass fraction of c5h12 选项，单击 Display 按钮，可得到如图 8-100 所示的戊烷浓度分布云图。按照同样的方法，还可以得到 O_2、CO 和 CO_2 的浓度分布云图，如图 8-101~图 8-103 所示。

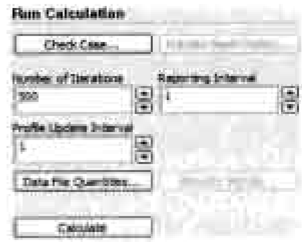


图 8-95　第二次迭代设置

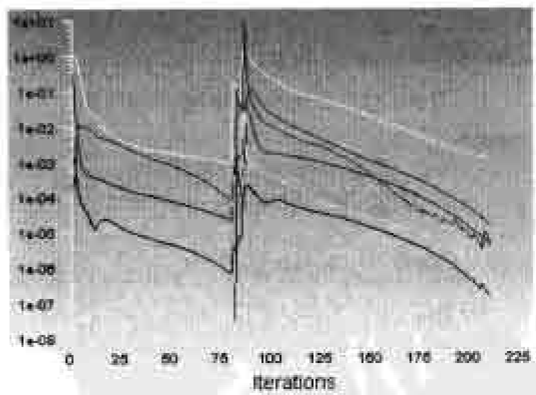


图 8-96　总的残差曲线



图 8-97　温度云图



图 8-98　混合分数分布云图

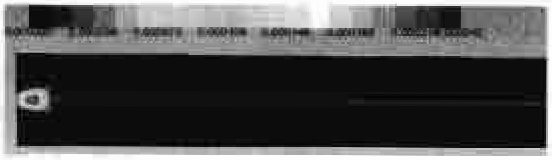


图 8-99　喷雾速率云图



图 8-100　戊烷浓度分布云图

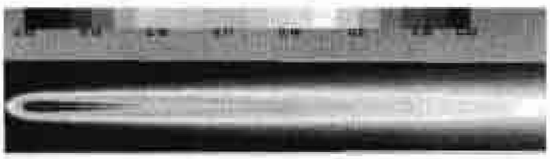


图 8-101　氧气浓度分布云图



图 8-102　一氧化碳浓度分布云图

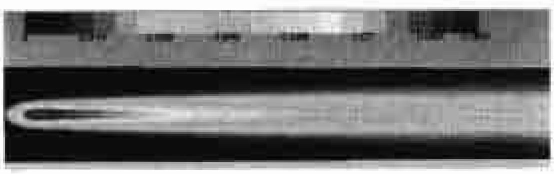


图 8-103　二氧化碳浓度分布云图

（22）在 Graphics and Animations 面板中双击 Particle Tracks 选项，弹出如图 8-104 所示的 Particle Tracks 对话框，选择 Release from Injections 为 injection-0，在 Options 栏中选中 Node Values 和 Auto Range 复选框，Style 选择为 line（线型），并在 Color by 栏中选择 Particle Variables…和 Particle Diameter 选项，Pulse Mode 设置为 Single、Report Type 为 Off、Skip 为 0，单击 Display 按钮，可在视图窗口中看到喷雾液滴的分布情况，如图 8-105 所示。

（23）双击 Graphics and Animations 面板中的 Vectors 选项，弹出 Vectors 对话框，单击 Display 按钮，按住鼠标中键框选进口区域，可得到如图 8-106 所示的进口速度矢量图。

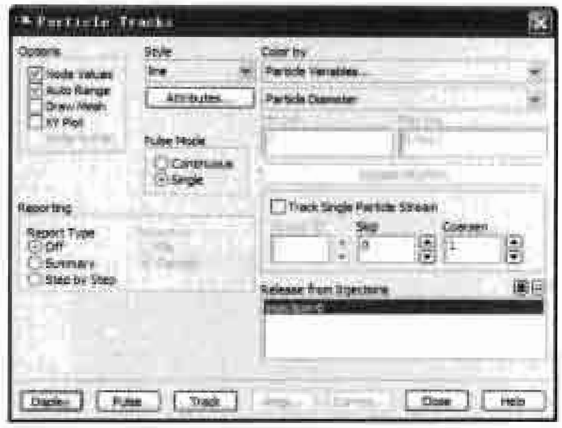


图 8-104　Particle Tracks 对话框

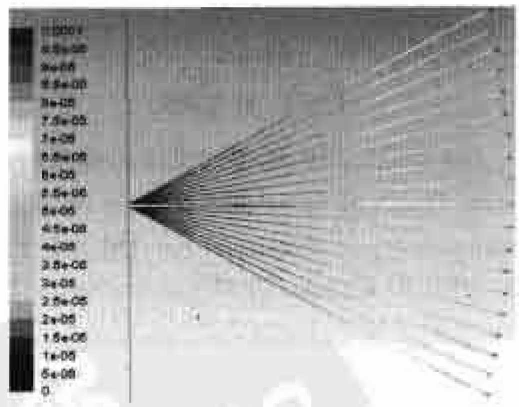


图 8-105　射流源液滴分布

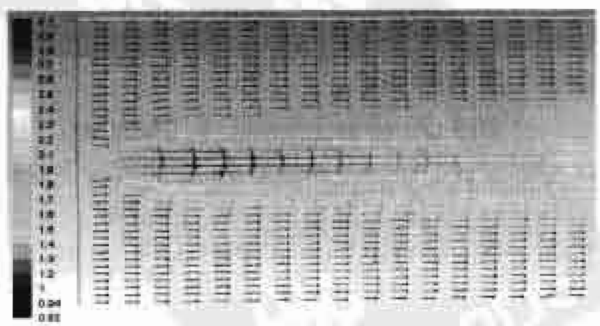


图 8-106　进口速度矢量图

（24）图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（8-5.cas 和 8-5.dat）。

（25）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

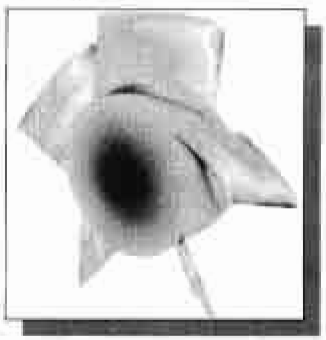
第9讲 转动模型

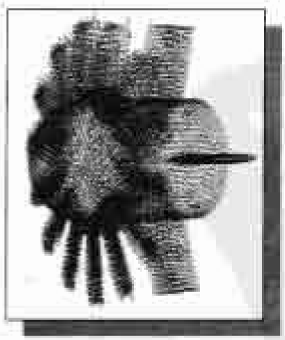
对于单一物体运动或旋转，可以采用坐标变换的方法来简化问题。然而，当多个物体之间存在相对旋转时，简单的转换参考坐标系已不能解决问题，如涡轮发动机、叶轮机械中静子和转子的干扰问题等，无论怎么设置参考系，都会遇到固体边界随时间变化的问题。这类问题可以利用FLUENT 12中相关的转动模型来解决。

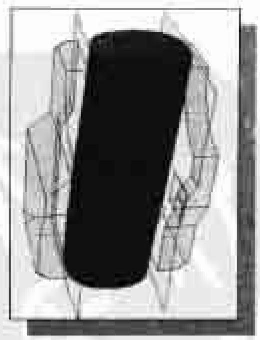
本讲将介绍FLUENT 12中用于模拟移动和变形区域的流体流动问题的动参考系模型、滑移网格模型及动网格模型，并通过3个实例的讲解帮助读者掌握转动模型的模拟过程。

本讲内容

- 实例·模仿——十字搅拌器周围液体流动
- 动参考系模型
- 滑移网格模型
- 动网格模型
- 实例·操作——活塞泵内流体流动
- 实例·练习——齿轮泵内流体流动







9.1 实例·模仿——十字搅拌器周围液体流动

十字搅拌器是工程中常用的一种简单的搅拌器械，如图9-1所示。经十字搅拌器搅拌后容器内流体的流动情况较为复杂，该如何设置搅拌速度以达到预期的效果呢？这些都是工程中所面临的实际问题。下面针对十字搅拌器内的流体流动运用MRF模型进行模拟，具体计算模型尺寸如图9-2所示。

【思路分析】

本例利用转动模型中的MRF模型进行模拟，建模时将计算区域分解成动区域与静区域两部分，即设置一个稍大于十字搅拌器（涵括搅拌器）的圆面作为动区域，剩下的部分作为静区域，整个模拟流程如图9-3所示。

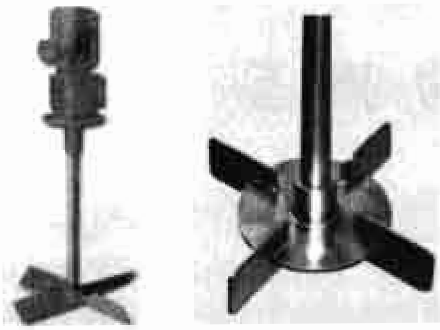


图 9-1　十字搅拌器

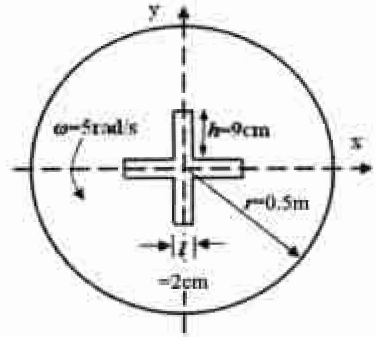


图 9-2　十字搅拌器模型尺寸

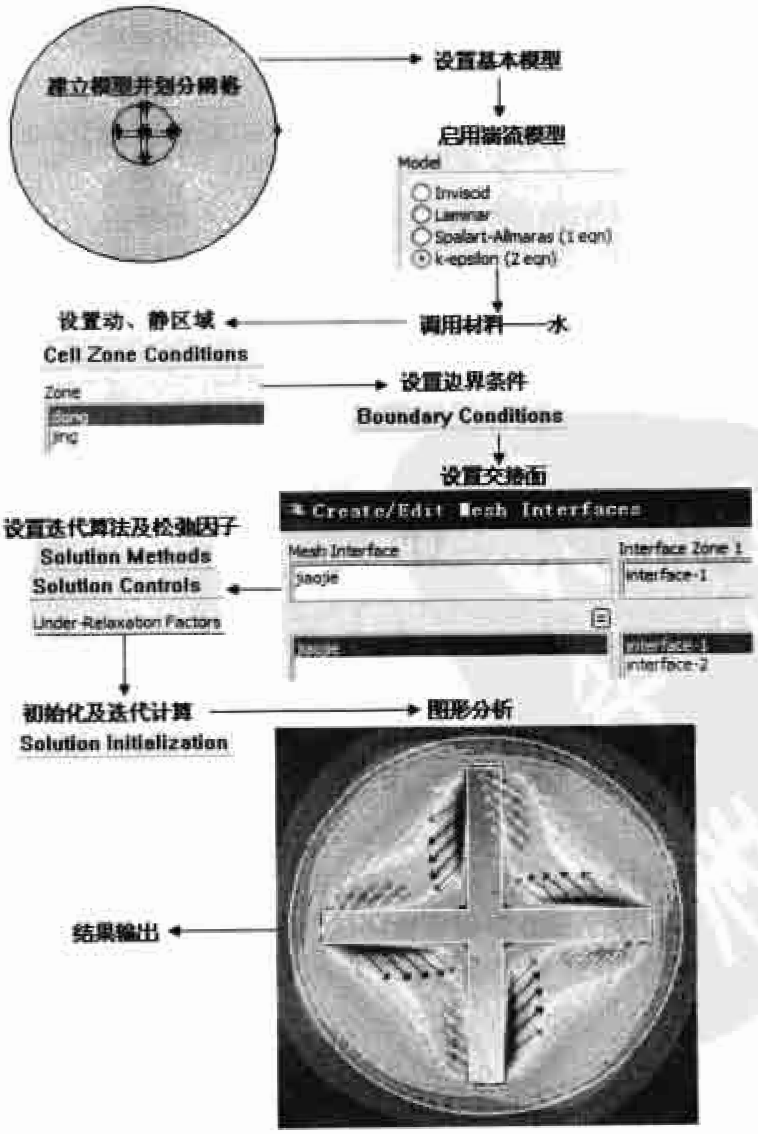


图 9-3　十字搅拌器周围液体流动模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch9\9-1.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch9\9-1.cas，9-1.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch9\9-1.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器，如图 9-4 所示。

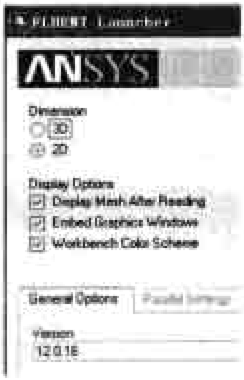


图 9-4　启动 2D 解算器

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 9-1.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，网格加载如图 9-5 所示。

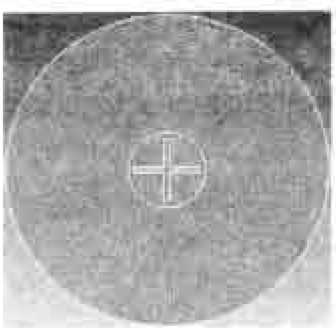


图 9-5　网格

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在打开的面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，如图 9-6 所示，对话框中显示了模型的尺寸范围，这里无须改动，单击 Close 按钮，关闭对话框。

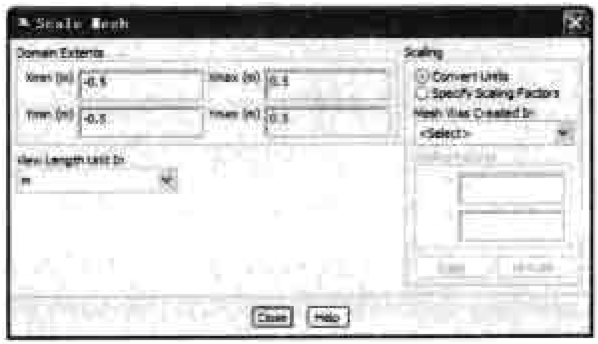


图 9-6　Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）在 General 面板的 Solver 栏中进行基本模型设置，这里保持默认。

（6）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框，选中 k-epsilon(2 eqn)单选按钮，并选择 k-epsilon Model 为 Standard，单击 OK 按钮。

（7）选择 Problem Setup 下的 Materials 选项，单击 Materials 面板中的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，单击 FLUENT Database 按钮，弹出如图 9-7 所示的 FLUENT Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表框中的 water-liquid (h2o<1>)选项，单击 Copy 按钮，即将 FLUENT 自带材料数据库中的水调用到当前工程中。回到 Create/Edit Materials 对话框，即可看到流体材料下拉列表框中已经有水。单击 Close 按钮，关闭 Create/Edit Materials 对话框。

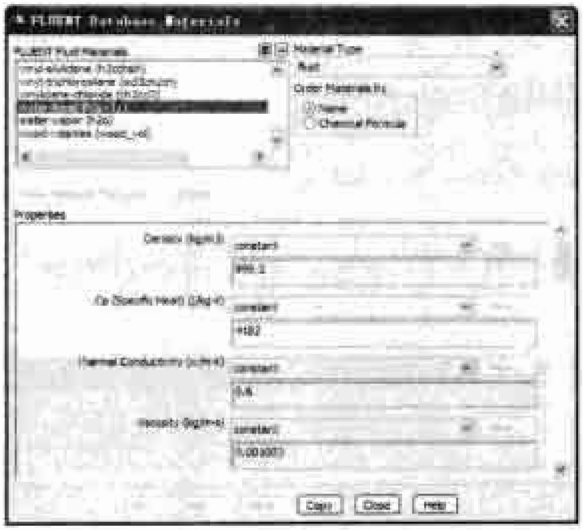


图 9-7　FLUENT Database Materials 对话框

（8）选择 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，展开如图 9-8 所示的 Cell Zone Conditions 面板。选择 dong 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 9-9 所示的 Fluid 对话框，在 Material Name 下拉列表框中选择 water-liquid 选项。然后选择 Motion 选项卡，在 Motion Type 下拉列表框中选择 Moving Reference Frame 选项，并设置 Rotational Velocity 栏中的 Speed(rad/s)为 5，保持其余为 0，单击 OK 按钮。回到 Cell Zone Conditions 面板。选择面板中的 jing 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 9-10 所示的 Fluid 对话框，在 Material Name 下拉列表框中选择 water-liquid 选项。然后选择 Motion 选项卡，在 Motion Type 下拉列表框中选择 Stationary 选项，保持其余为 0，单击 OK 按钮。这样，即设置了 MRF 模型，动区域旋转，而静区域保持静止。

（9）单击 Cell Zone Conditions 面板右下角的 Operating Conditions 按钮，弹出操作环境设置对话框，这里保持默认设置，单击 OK 按钮。

（10）定义本例的边界条件。选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 面板，在 Boundary Conditions 面板中选择 jbq-w 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Wall 对话框，如图 9-11 所示，在 Momentum 选项卡中选中 Wall Motion 栏中的 Moving Wall 单选按钮，并选中 Motion 栏中的 Relative to Adjacent Cell Zone 和 Rotational 单选按钮，保持 Speed(rad/s)和 Rotation-Axis Origin 的 X(m)、Y(m)为 0，单击 OK 按钮，即定义十字搅拌器叶轮与邻近的区域一起以 5rad/s 同步转动。其余边界保持默认设置。

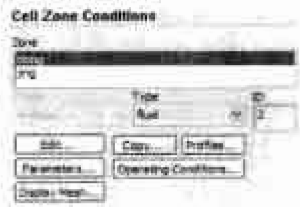


图 9-8　Cell Zone Conditions 面板

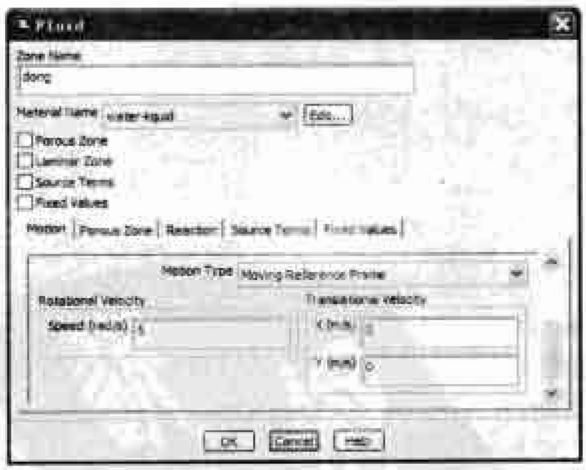


图 9-9　动区域设置

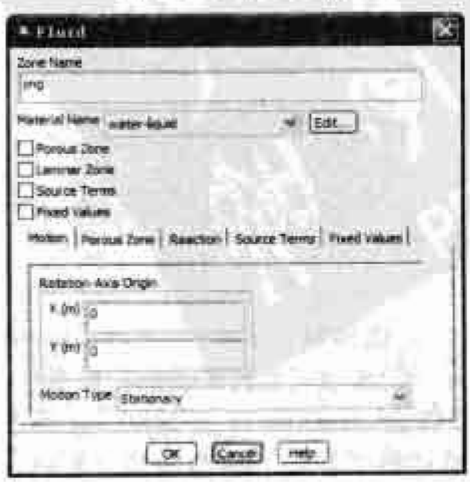


图 9-10　静区域设置

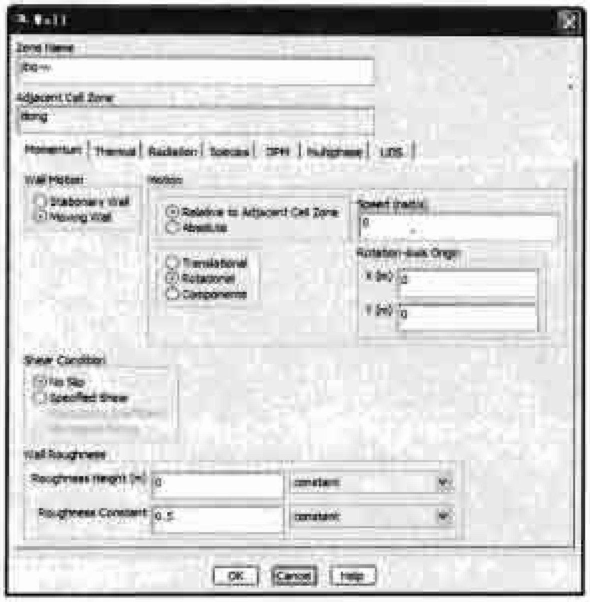


图 9-11　搅拌器壁面设置

（11）除了定义上述边界之外，还要定义动、静区域的交界面，选择 Problem Setup 下的 Mesh Interfaces 选项，弹出如图 9-12 所示的面板，设置 Mesh Interfaces 为 jiaojie，单击 Create/Edit 按钮，弹出如图 9-13 所示的 Create/Edit Mesh Interfaces 对话框，设置 Mesh Interface 为 jiaojie，设置 Interface Zone 1 为 interface-1、Interface Zone 2 为 interface-2，单击 Create 按钮创建交界面。

（12）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，保持默认的算法设置。选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置。

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在打开的面板中选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Residual Monitors 对话框，设置所有项的收敛精度均为 0.0001，单击 OK 按钮。

（14）选择 Solution Initialization 面板中的 Compute from 为 all-zones，如图 9-14 所示，单击 Initialize 按钮。



图 9-12　Mesh Interfaces 面板

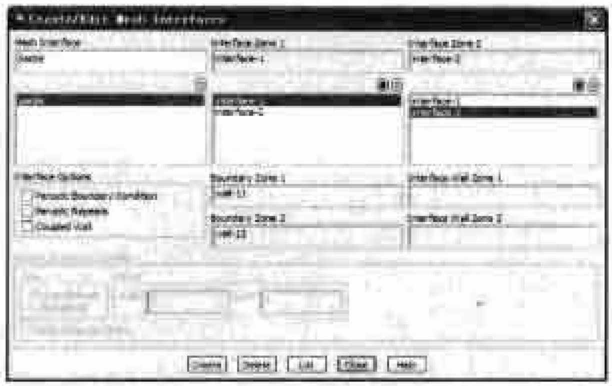


图 9-13　Create/Edit Mesh Interfaces 对话框

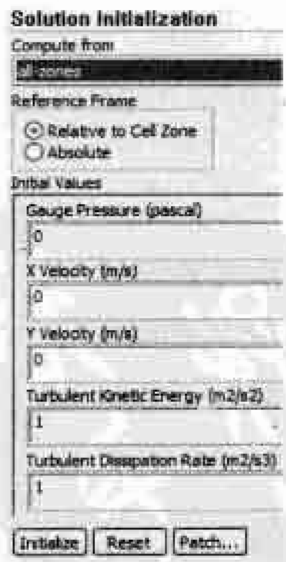


图 9-14　初始化

（15）选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 9-15 所示的面板中设置 Number of Iterations 为 1000，单击 Calculate 按钮开始计算。计算结束后的残差曲线如图 9-16 所示。

（16）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的面板中双击 Contours 选项，弹出 Contours 对话框，

选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Velocity…和 Velocity Magnitude 选项，单击 Display 按钮，可得到如图 9-17 所示的速度云图。若在 Contours of 栏中选择 Pressure…和 Static Pressure 选项，单击 Display 按钮，可得到如图 9-18 所示的压强云图。改变 Contours of 栏中的选项为 Turbulence…和 Turbulence Dissipation Rate(Epsilon)，单击 Display 按钮，可看到此时的紊动能分布云图，如图 9-19 所示。

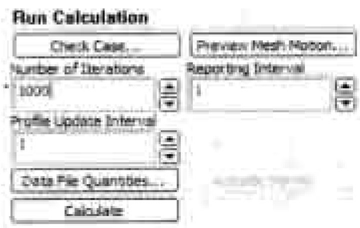


图 9-15 迭代设置

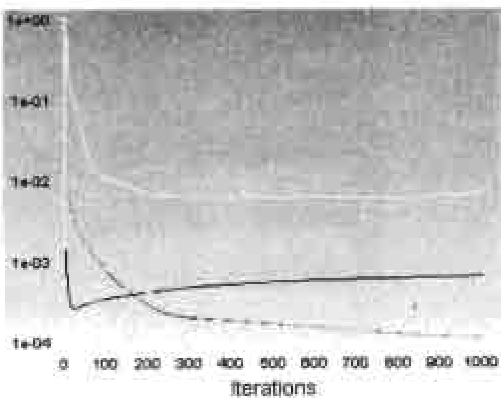


图 9-16 残差曲线

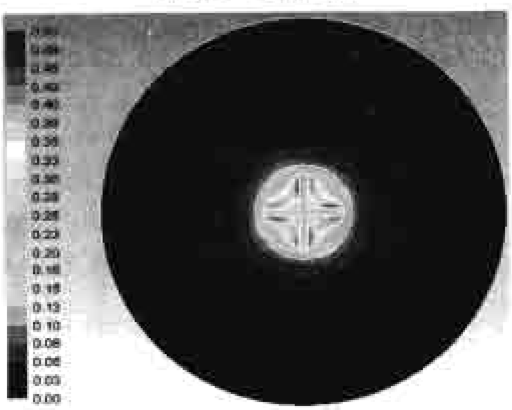


图 9-17 速度云图

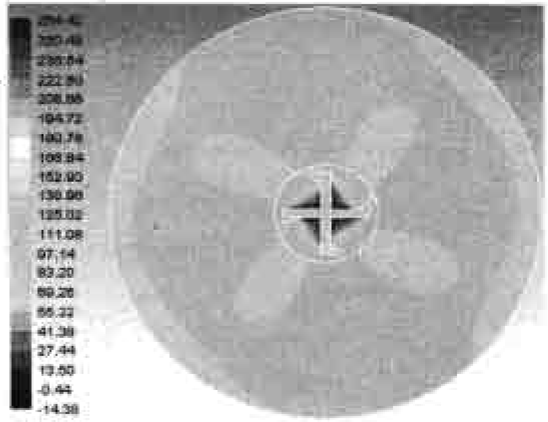


图 9-18 压强云图

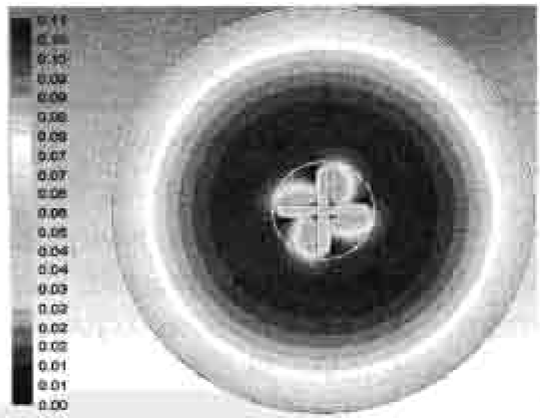


图 9-19 紊动能云图

（17）双击 Graphics and Animations 面板中的 Vectors 选项，弹出如图 9-20 所示的 Vectors 对话框，选中 Options 栏中的 Global Range、Auto Range、Auto Scale 复选框，选择 Color by 为 Velocity…和 Velocity Magnitude，设置矢量形式 Style 为 arrow，并设置其 Scale 为 2，Skip 为 1，其余保持默认，单击 Display 按钮，得到搅拌容器内部的速度矢量图。按住鼠标中键由左上角至右下角框选十字搅拌器，松开鼠标即可得到如图 9-21 所示的放大了的十字搅拌器四周的速度矢量图。

（18）图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（9-1.cas 和 9-1.dat）。

（19）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

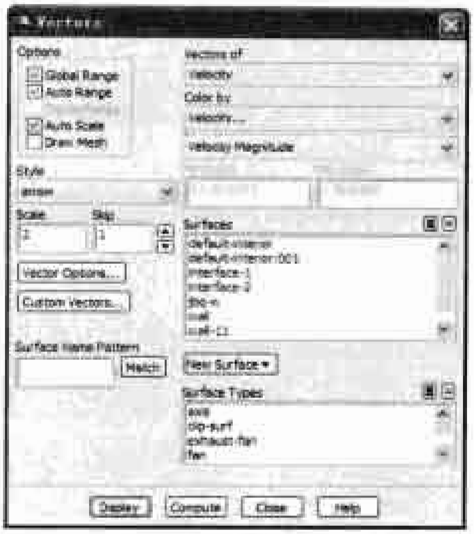


图 9-20　Vectors 对话框

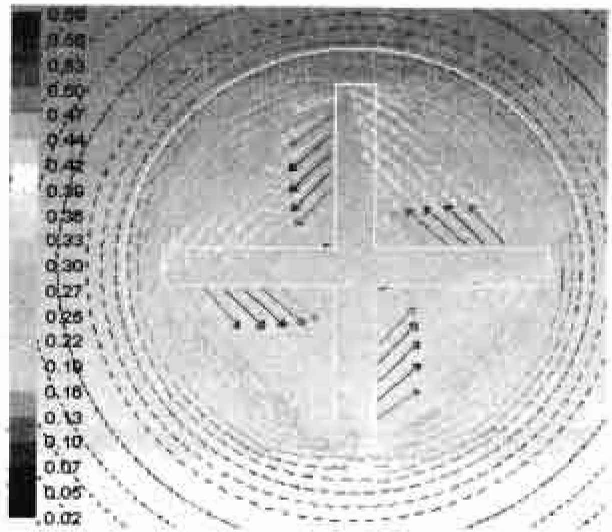


图 9-21　速度矢量图

9.2　动参考系模型

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch9\9-2.avi 文件。

动参考系（MRF）模型是将不同旋转或移动速度的每个区域进行稳态近似，因此当边界上流动区域几乎均匀混合时，这种方法比较适宜。如转子和定子之间交互作用相对较弱的叶轮机械可以使用 MRF 模型，叶轮片交互作用相对较弱，且无大范围瞬态影响的混合槽也可以使用 MRF 模型。但当要精确模拟叶轮片的瞬态流场时，MRF 就无能为力了。MRF 模型的整个计算区域被分成多个小的子域，每个子域有各自的运动方式，或静止或旋转或平移。控制方程在每个子域内分别进行求解，在子域的交界面上则通过速度换算成绝对速度的形式进行各子域流场信息的交换。如果交界面上的网格是正则的，即两侧区域在交界面上共用相同的网格节点，其网格划分方法与常规方法一样。如果交界面上的网格是非正则的，即交界面两侧区域网格不一样且交界面是重合的两个面，分别属于不同的区域，这时交界面上的信息是通过插值相互传递的。运用 MRF 模型时需要进行如下设置：

（1）在 General 面板的 Solver 栏中设置速度的形式，如图 9-22 所示，使用压力基求解器时，可以设置为相对速度（Relative）或绝对速度（Absolute），但使用密度基求解器时只能选择绝对速度。



图 9-22　设置求解器中的速度形式

（2）在 Cell Zone Conditions 面板中，选择相应的流体（Fluid）区域或固体（solid）区域，单击 Edit 按钮，在弹出的 Fluid 对话框中设置相应的旋转轴原点和旋转方向，如图 9-23 所示。

在运动类型（Motion Type）下拉列表框中选择运动参考系（Moving Reference Frame），并设置旋转速度（Rotational Velocity）或平移速度（Translational Velocity）的大小。

（3）在 Wall 对话框的 Momentum 选项卡中选中 Moving Wall 单选按钮，设置壁面运动方式是旋转、平移或既旋转又平移，并定义其旋转或平移的速度，如图 9-24 所示。



图 9-23　区域运动设置（MRF）

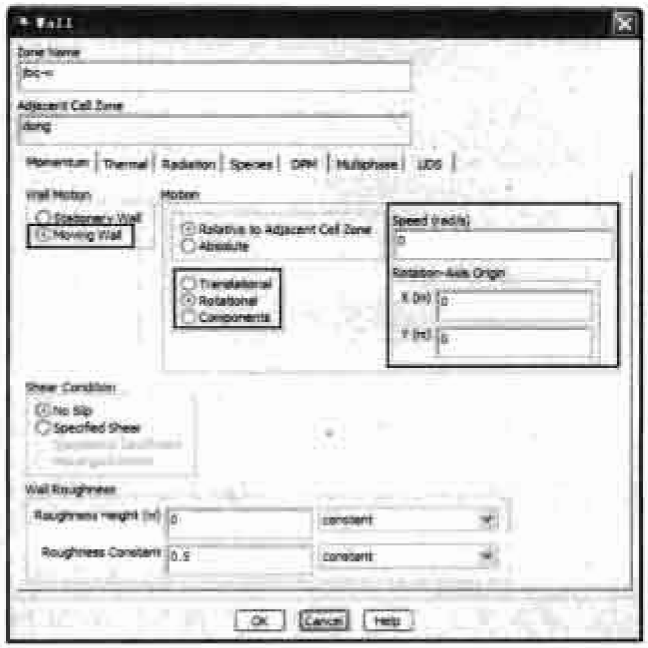


图 9-24　壁面运动设置

9.3　滑移网格模型

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch9\9-3.avi 文件。

滑移网格模型可以处理非定常问题，这是与 MRF 模型的最大区别。该模型在两个或更多的单元区域应用滑移网格技术，每个单元区域至少有一个边界的分界面，该分界面区域和另一单元区域相邻，相邻的单元区域的分界面互相联系形成“网格分界面”，这两个单元区域互相之间相对沿网格分界面移动。在计算过程中，单元区域沿网格分界面相互之间滑动，而两个区域的网格不会发生变化。滑移网格技术中设定的交界面在计算过程中一部分与相邻子域相连，而其余区域不与相邻子域相连。与相邻子域相连接的区域被称为内部区域，与相邻子域不相连的区域在平动问题中被称为壁面区域，而在周期性流动问题中则被称为周期区域。当每次迭代结束后，解算器会重新计算内部区域的范围，将交界面的其余部分划定为壁面区域或周期性区域，并在壁面区域或周期性区域上设定相应的边界条件。在新的迭代步上，只计算内部区域上的通量。如图 9-25 所示，分界面区域由 A-B 面和 B-C 面以及 D-E 面和 E-F 面组成，交叉处产生 a-d 面、d-b 面、b-e 面和 e-c 面等。在两个单元区域重叠处产生 d-b 面、b-e 面和 e-c 面而组成内部区域，剩余的 a-d 面和 c-f 面形成成对的周期性区域。

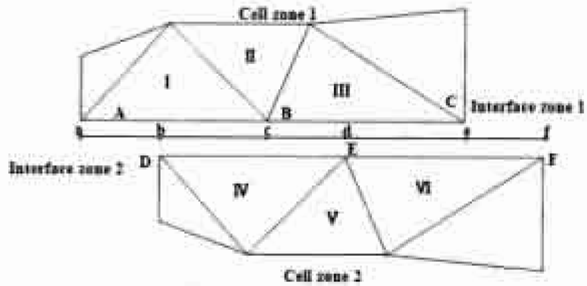


图 9-25　二维网格分界面

运用滑移网格模型时需要进行如下设置：

（1）计算非定常时，激活非定常设置，即在 Solver 栏中设置 Time 为 Transient。

（2）在 Fluid 对话框中，设置运动类型（Motion Type）为滑移网格（Moving Mesh），并设置旋转速度（Rotational Velocity）或平移速度（Translational Velocity），如图 9-26 所示。

（3）定义壁面运动方式及其速度，与动参考系模型设置一样。

（4）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Mesh Interfaces 选项，在打开的面板中选择 Mesh Interfaces 下拉列表框中的分界面，单击 Create/Edit 按钮，弹出如图 9-27 所示的 Create/Edit Mesh Interfaces 对话框，在 Mesh Interface 文本输入框中输入分界面的名称，在 Interface Zone 1 和 Interface Zone 2 下拉列表框中各选择一个组成网格分界面的两分界面区域，次序无关。Interface Options 栏中有 Periodic Repeats（周期性）与 Coupled Wall（耦合）复选框，若为周期性问题即选中 Periodic Repeats 复选框，若分界面位于固体和流体区域，则选中 Coupled Wall 复选框，最后单击 Create 按钮。

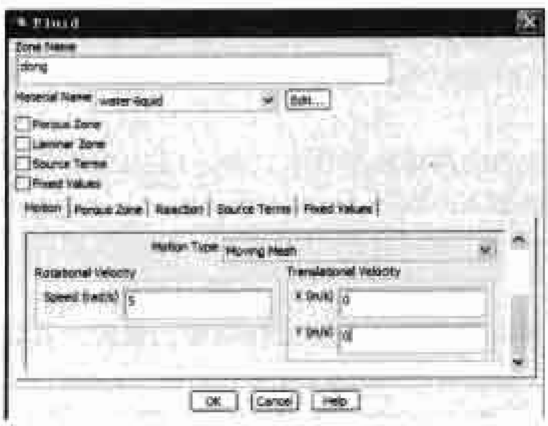


图 9-26　区域运动设置（滑移网格）

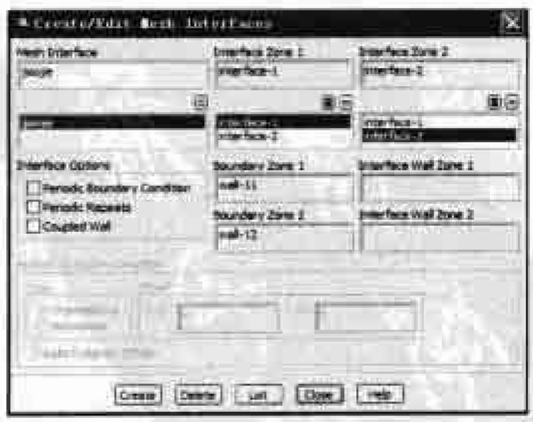


图 9-27　Create/Edit Mesh Interfaces 对话框

9.4　动网格模型

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch9\9-4.avi 文件。

动网格模型用于计算运动边界问题，以及边界或流域内某个物体的移动问题。在计算之前

要先定义体网格的初始状态，在边界发生运动或变形后，其流域的网格重新划分是在 FLUENT 内部自动完成的，而边界的形变和运动过程可以用边界型函数来定义，也可以用 UDF 函数来定义。动网格模型求解的是非定常问题，需要消耗较大的硬件资源。

动网格模型可以求解刚性运动、转动或者平动问题，如汽车发动机气缸内活塞的往复运动、注射器中的活塞运动及机翼的副翼、襟翼在飞行过程中的运动等；还可以计算边界发生形变的问题，如气球充气的过程、飞行器的气动弹性问题等；FLUENT 提供的六自由度动网格模型求解器可以定义和描述边界或运动物体的运动状况，可用于解决多体分离过程。

FLUENT 提供了 3 种动网格运动的方法来更新变形区域内的体网格，即弹性光顺法、动态层技术和局部网格重构法。

弹性光顺法是根据边界节点上的已知位移来光滑调整流域内节点的位置。网格上任意两节点之间的连线被理想化成互相连接的弹簧。边界上任意一个网格节点的位移都会导致与之相互连接的弹簧中产生弹性力，进而导致临近网格节点上的力的平衡被打破，这样边界节点上的位移就通过体网格在流域中传播过去。经过反复迭代，最终整个弹簧网格系统达到新的平衡时，就可以得到一个变形后的、新的网格系统。

对于六面体网格、楔形网格等，动态层技术可以根据与运动的物面邻近的网格层的高度来决定增加或减小网格的层数。它在边界上假定一个优化的网格层高度，在边界移动、变形时，如果邻近边界的一层网格的高度大于优化高度一定比例时，就在边界面与相邻网格层之间增加一层网格。若邻近边界的一层网格的高度小于优化高度一定比例时，也会将邻近边界一层的网格删除。动态层技术就是通过这种方法来使边界附近的网格保持一定的密度。

当边界位移相对局部单元尺寸较大时，单元质量将恶化或单元将退化，从而导致下一时间步的求解收敛困难。为了避免这个问题，把质量差的网格单元进行重新划分，这就是局部网格重构法。对于单元尺寸小于指定单元尺寸的最小值，或大于指定单元尺寸的最大值，或畸变度大于最大畸变度时，需要进行重新划分。除了体网格重构外，边界上网格的三角形面或线性面也将随同体网格一起重构。

除了具有上述 3 种更新变形区域内体网格方法的动网格模型技术之外，FLUENT 还提供了六自由度（6 DOF）求解器。6 DOF 可以根据作用在流场中某个物体上的重力、空气动力或其他力、力矩来计算物体的位置和姿态。6 DOF 技术配合动网格使用可以解决一些流固耦合、多体分离的实际工程问题。

FLUENT 中进行动网格计算时，需要激活动网格计算模块，并进行相应的设置，其相关设置如下：

（1）首先需要选择操作面板中 Problem Setup 下的 Dynamic Mesh 选项，弹出如图 9-28 所示的 Dynamic Mesh 面板，选中 Dynamic Mesh 复选框。

（2）如图 9-28 所示面板的 Mesh Methods 栏中有 Smoothing（弹性网格光顺更新）、Layering（动态层网格更新）和 Remeshing（局部网格重构）3 个复选框。选中 Smoothing 复选框时，网格光顺参数主要包括弹性常数因子、边界节点松弛、收敛公差、迭代数等，如图 9-29 所示。选中 Layering 复选框时，Options 栏中有常数高度和常数变化率两个选项，常数高度用于统一层高度的情况，而常数变化率用于有弯曲的区域，如图 9-30 所示；Split Factor 为分裂因子，0.4 表示网格高度超过理想高度 1.4 倍时发生分裂；Collapse Factor 为合并因子，0.04 表示压缩到理想高度的 0.04 倍时与邻近单元层合并。选中 Remeshing 复选框时，Options 栏中有尺寸函

数、必须改善扭曲、面重划分（仅对三维）3 个选项，其中，最小长度、最大长度比例及最大单元扭曲必须设定，而当采用尺寸函数时，还需要设置尺寸函数求解、尺寸函数的变化率等参数，如图 9-31 所示。

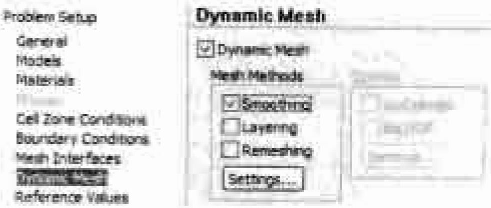


图 9-28　Dynamic Mesh 面板

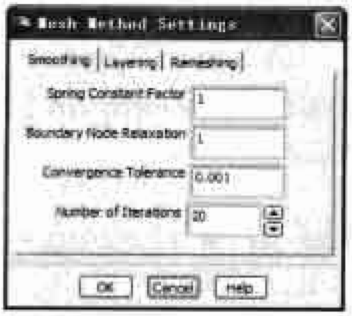


图 9-29　Smoothing 参数设置



图 9-30　Layering 参数设置

（3）如图 9-28 所示面板的 Options 栏内有 In-Cylinder（活塞内腔）、Six DOF（六自由度）两个复选框，对于活塞腔内的往复运动，需要选中 In-Cylinder 复选框，其参数设置面板如图 9-32 所示，主要设置曲柄轴、曲柄轴起始角度、曲柄周期、活塞冲程等参数。对于如自由落体等六自由度问题，需要选中 Six DOF 复选框，其参数设置面板如图 9-33 所示，主要设置重力加速度方向。

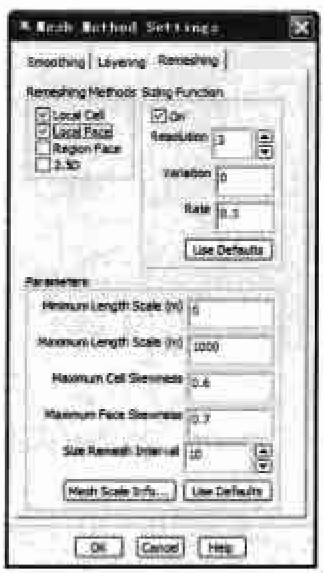


图 9-31　Remeshing 设置

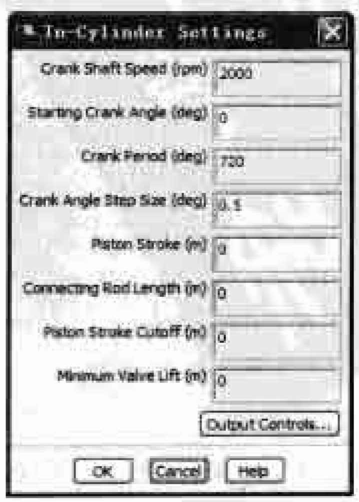


图 9-32　活塞内腔参数设置



图 9-33　六自由度参数设置

（4）动边界的运动方式可以采用动边界文件（Profile）和自定义函数（UDF）来实现。其中，动边界文件只需在记事本中按固定格式编写后导入 FLUENT 中即可。UDF 主要有 3 个宏来设置动网格的运动，即 DEFINE_CG_MOTION、DEFINE_GEOM 和 DEFINE_GRID_MOTION 3 个，编写好的 UDF 编译成功后导入 FLUENT 即可实现所需运动。

9.5　实例·操作——活塞泵内流体流动

活塞泵在实际工程中扮演着重要的角色，汽车发动机、压缩机和抽油机等都需要用到活塞泵，如图 9-34 所示。流体在活塞泵中的物性变化是活塞泵安全有效工作的关键参数，本例对一个简化的活塞泵系统进行模拟，其尺寸如图 9-35 所示，中间为活塞，以一定的速度向下移动，驱使泵内流体向两侧流动。

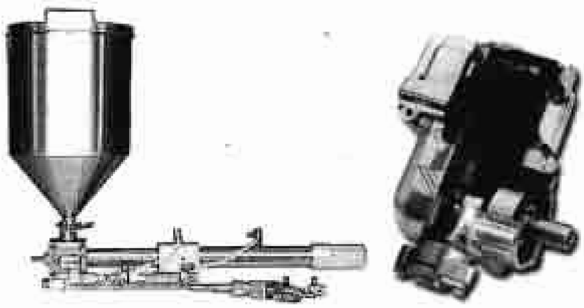


图 9-34　活塞泵

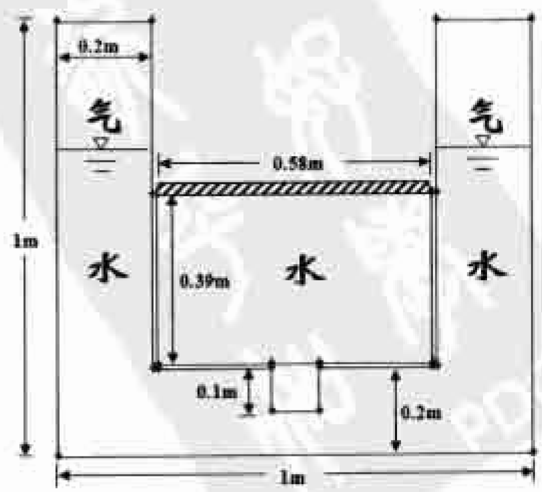


图 9-35　活塞泵计算区域尺寸

【思路分析】

本例活塞以一定的速度向下运动，活塞泵内的网格可以采用动态层技术实现运动。另外，本例涉及气液两相流动，且含有自由液面，故还需调用 VOF 模型。具体的流程如图 9-36 所示。

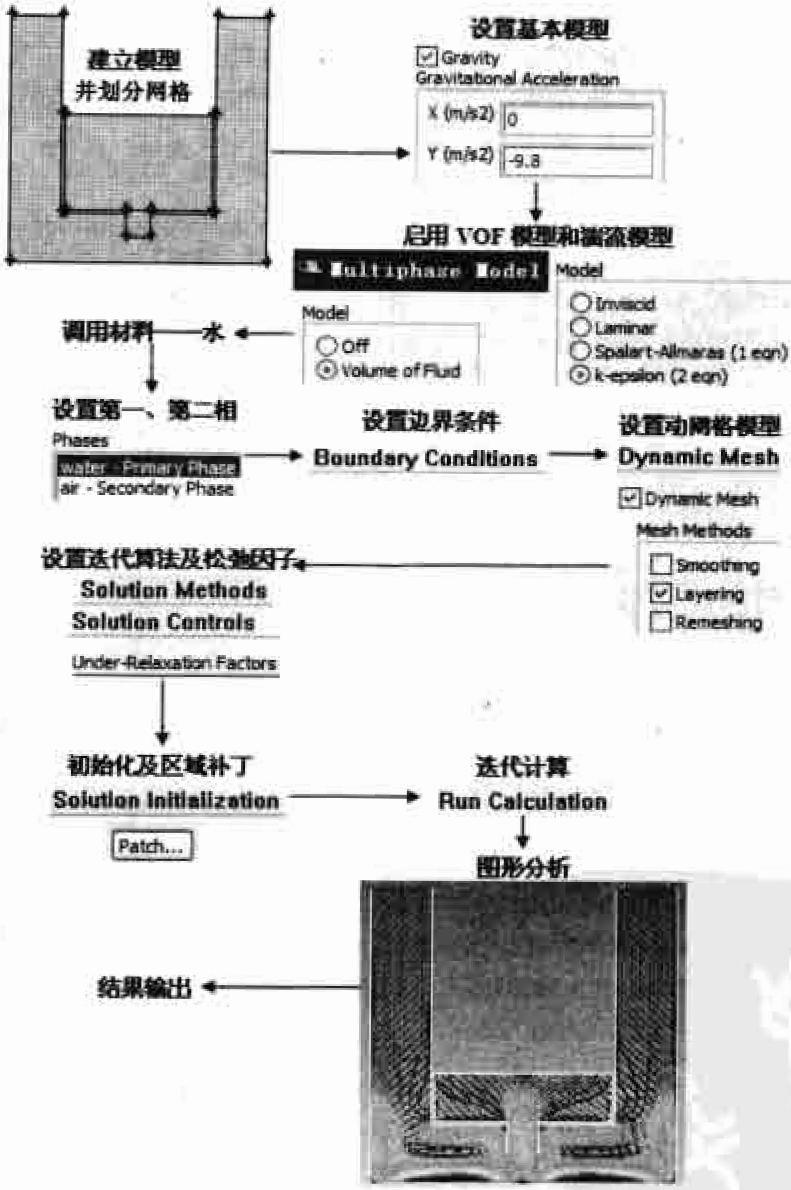


图 9-36　活塞泵内流体流动模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch9\9-5.msh，huosai.txt 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch9\9-5.cas，9-5.dat，9-5-0.2s.cas，9-5-0.2s.dat，9-5-0.4s.cas，9-5-0.4s.dat，9-5-0.6s.cas，9-5-0.6s.dat，9-5-0.8s.cas，9-5-0.8s.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch9\9-5.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器。

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 9-5.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，网格加载如图 9-37 所示。

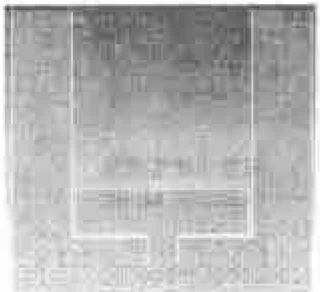


图 9-37　网格

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在展开的面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，查看模型的尺寸范围后，单击 Close 按钮，关闭对话框。

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）在 General 面板的 Solver 栏中进行基本模型设置，这里选择 Time 为 Transient，并选中 Gravity 复选框，设置 Y(m/s2)为-9.8，如图 9-38 所示。

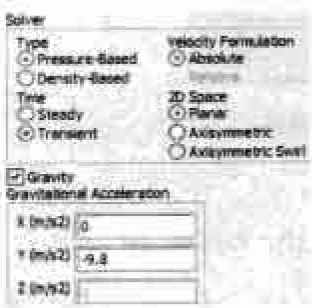


图 9-38　模型基本设置

（6）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，双击 Multiphase-Off 选项，弹出如图 9-39 所示的 Multiphase Model 对话框，选择 Model 为 Volume of Fluid，设置 Number of Eulerian Phases 为 2 相（气相+液相），并选中 Open Channel Flow 复选框，单击 OK 按钮。回到 Models 面板，双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框，选中 k-epsilon (2 eqn)单选按钮，并选择 k-epsilon Model 为 Standard，如图 9-40 所示，单击 OK 按钮。

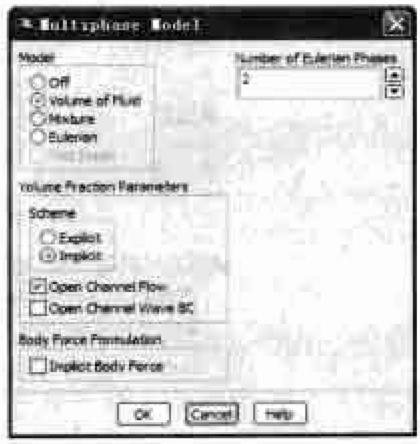


图 9-39　VOF 模型设置

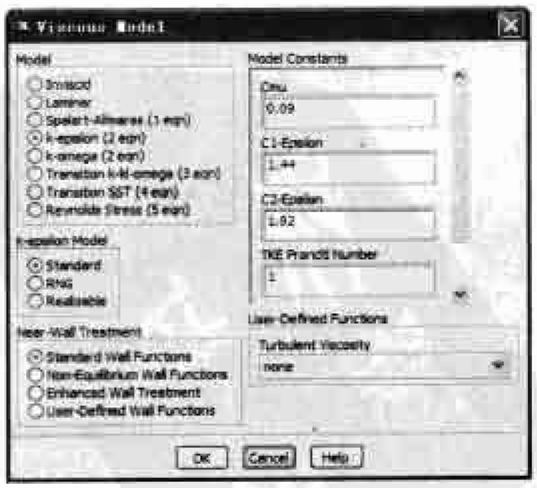


图 9-40　湍流模型设置

（7）单击 Materials 面板中的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，单击 FLUENT Database 按钮，弹出 FLUENT Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表框中的 water-liquid 选项，单击 Copy 按钮。回到 Create/Edit Materials 对话框，即可看到流体材料下拉列表框中已经有

水。单击 Close 按钮，关闭 Create/Edit Materials 对话框。

（8）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Phases 选项，双击 Phases 面板中的 Phase-Primary Phase 选项，弹出如图 9-41 所示的 Primary Phase 对话框，改变 Name 为 water，并选择 Phase Material（第一相材料）为 water-liquid，单击 OK 按钮。回到 Phases 面板，双击 Phase-Secondary Phase，弹出如图 9-42 所示的 Secondary Phase 对话框，改变 Name 为 air，并选择 Phase Material（第二相材料）为 air，单击 OK 按钮。



图 9-41　第一相设置



图 9-42　第二相设置

（9）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，在 Boundary Conditions 面板中选择 p-out 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Pressure Outlet 对话框，如图 9-43 所示，保持总压为 0，选择 Turbulence 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Backflow Turbulent Intensity(%)为 1、Backflow Hydraulic Diameter(m)为 0.2，单击 OK 按钮。

（10）设置动网格模型。选择操作面板中 Problem Setup 下的 Dynamic Mesh 选项，弹出如图 9-44 所示的 Dynamic Mesh 面板，选中 Dynamic Mesh 复选框，并在 Mesh Methods 栏中选中 Layering（动态层技术）复选框。单击 Settings 按钮，弹出 Mesh Method Settings 对话框，保持 Layering 默认参数设置，单击 OK 按钮。

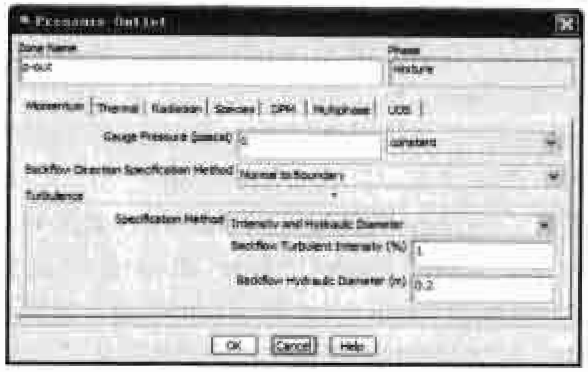


图 9-43　压力出口设置

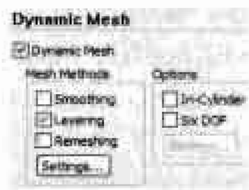


图 9-44　Dynamic Mesh 面板

（11）选择 Define→Profiles 命令，弹出如图 9-45 所示的 Profiles 对话框，单击 Read 按钮，在工作目录中找到 huosai.txt，读入后可在 Profile 列表框中看到其高亮显示。单击 Apply 按钮和 Close 按钮，关闭 Profiles 对话框。



图 9-45　Profiles 对话框

（12）回到 Dynamic Mesh 面板，单击 Dynamic Mesh Zones 栏中的 Create/Edit 按钮，弹出如图 9-46 所示的 Dynamic Mesh Zones 对话框。在 Zone Names 下拉列表框中选择 default-interior:015 选项，设置其 Type 为 Rigid Body，并在 Motion Attributes 选项卡中设置 Motion UDF/Profile 为 huosai。然后选择 Meshing Options 选项卡，设置邻接区域的网格尺寸均为 0.01m，如图 9-47 所示。单击

Create 按钮，即可在 Dynamic Mesh Zones 列表框中查看到已定义的动网格区域。按照同样的方式设置活塞也为刚性运动。而活塞泵底边（neidi 和 default-interior:013）设置为 Stationary，邻接网格尺寸也为 0.01m。活塞泵两个侧壁需要定义为 Deforming（变形），设置其 Geometry Definition 为 faceted，如图 9-48 所示。且在 Mesh Options 选项卡中设置 Methods 为 Smoothing 和 Remeshing，并设置 Smoothing Methods 为 Spring、Remeshing Methods 为 Region，在 Zone Parameters 栏中设置 Minimum Length Scale(m)为 0.01、Maximum Length Scale(m)也为 0.01、Maximum Skewness 为 0，如图 9-49 所示，单击 Create 按钮。所有定义好的动网格区域均呈现在 Dynamic Mesh 面板的 Dynamic Mesh Zones 列表框内，如图 9-50 所示，供用户查看。



图 9-46 Dynamic Mesh Zones 对话框



图 9-47 相邻网格尺寸定义

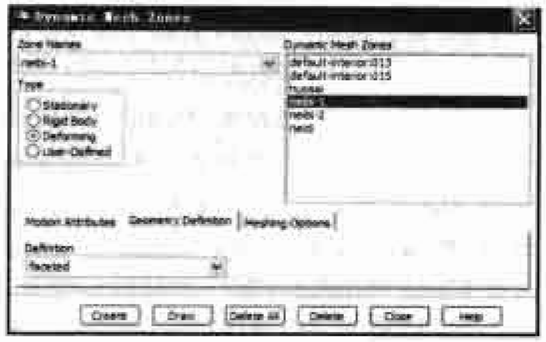


图 9-48 静止区域定义

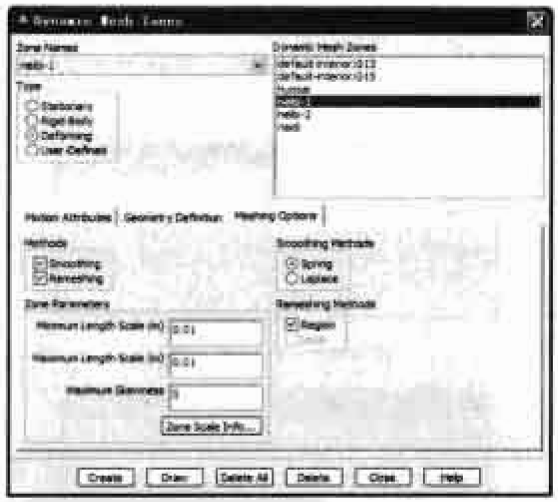


图 9-49 变形区域定义

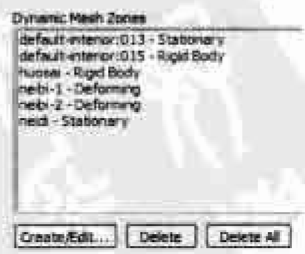


图 9-50 定义好的动网格区域

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，保持默认的算法设置。选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置。

（14）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在展开的面板中选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出

Residual Monitors 对话框，设置所有项的收敛精度均为 0.0001，单击 OK 按钮。

（15）选择 Solution Initialization 面板中的 Compute from 为 all-zones，设置 air Volume Fraction 为 1，如图 9-51 所示，单击 Initialize 按钮。

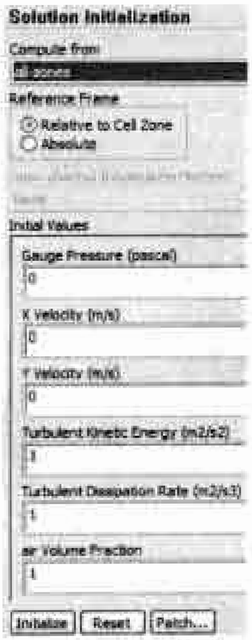


图 9-51　初始化

（16）选择 Adapt→Region 命令，弹出如图 9-52 所示的 Region Adaption 对话框，在 Input Coordinates 栏中设置 X Min(m)和 Y Min (m)均为 0，而 X Max(m)和 Y Max(m)分别为 1 和 0.65，单击 Mark 按钮，生成一个临时区域。

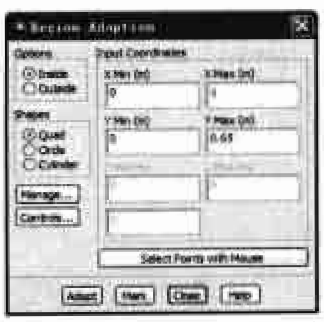


图 9-52　Region Adaption 对话框

（17）单击 Solution Initialization 面板中的 Patch...按钮，弹出如图 9-53 所示的 Patch 对话框。选择 Zones to Patch 栏中的 neiyu 选项和 Registers to Patch 栏中的 hexahedron-r0 选项，然后选择 Phase 为 air，并选择 Variable 栏中的 Volume Fraction 选项，设置 Value 为 0，单击 Patch 按钮，即将临时区域和原先定义好的泵内区域定义为全部含有水。

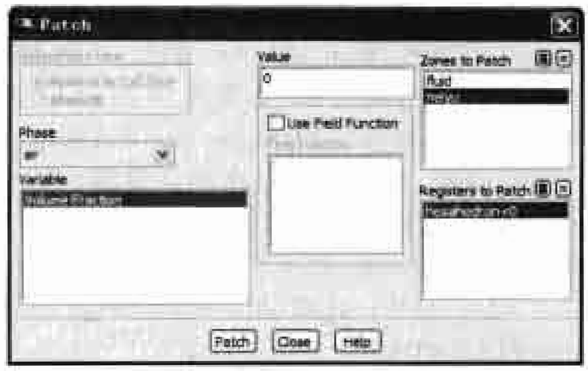


图 9-53　Patch 对话框

（18）选择操作面板中 Solution 下的 Calculation Activities 选项，在展开的面板中设置 Autosave Every(Time Steps)为 200，如图 9-54 所示，即每 200 步自动保存一次工程文件和数据文件。

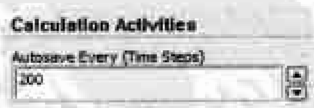


图 9-54　自动保存设置

（19）选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 9-55 所示的面板中设置 Number of Time Steps 为 800，设置 Time Step Size(s)为 0.001、Time Stepping Method 为 Fixed，并设置 Max Iterations/Time Step 为 40，单击 Calculate 按钮开始计算。计算结束后的残差曲线如图 9-56 所示。

（20）计算结束后，可在工程文件夹下看到每 200 步自动保存的数据文件，选择 File→Read→Case & Data 命令，选择 9-5-0.2s.cas 和 9-5-0.2s.dat。调入后，选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的面板中双击 Contours 按钮，弹出 Contours 对

话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Velocity…和 Velocity Magnitude 选项，单击 Display 按钮，可得到如图 9-57 所示的速度云图。若在 Contours of 栏中选择 Pressure…和 Static Pressure 选项，单击 Display 按钮，可得到如图 9-58 所示的压强云图。改变 Contours of 栏中的选项为 Phases…和 air，单击 Display 按钮，可看到此时的空气体积分数云图，如图 9-59 所示。按照同样的方式，调入 9-5-0.8s.cas 和 9-5-0.8s.dat，在 Contours 对话框中进行相关设置，显示 0.8s 时的速度云图、压强云图和空气的体积分数云图，如图 9-60~图 9-62 所示。

（21）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

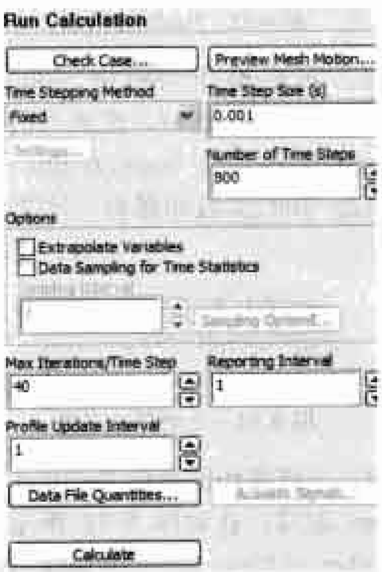


图 9-55　迭代设置

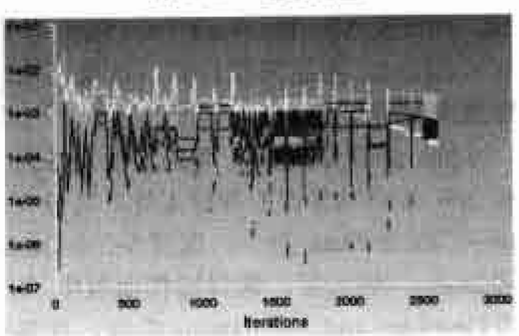


图 9-56　残差曲线

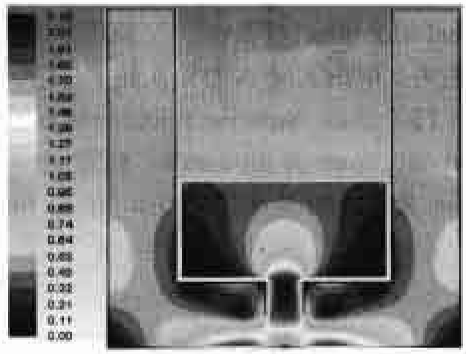


图 9-57　0.2s 时的速度云图

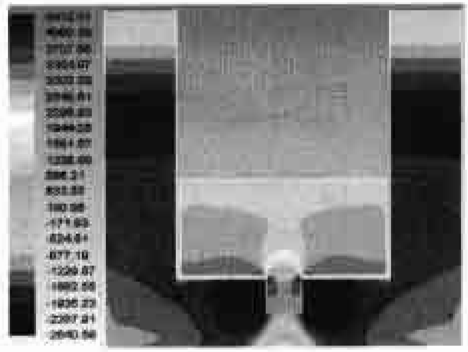


图 9-58　0.2s 时的压强云图

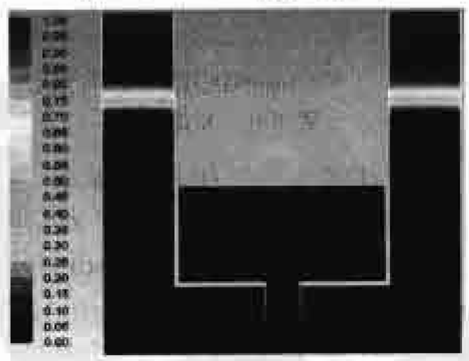


图 9-59　0.2s 时的空气体积分数云图

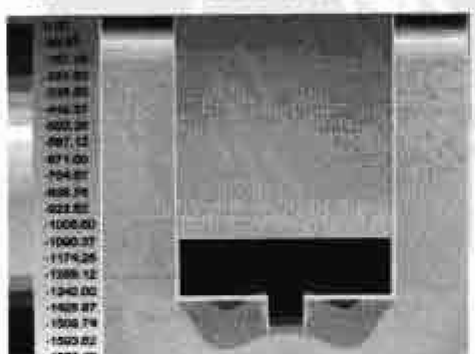


图 9-60　0.8s 时的速度云图

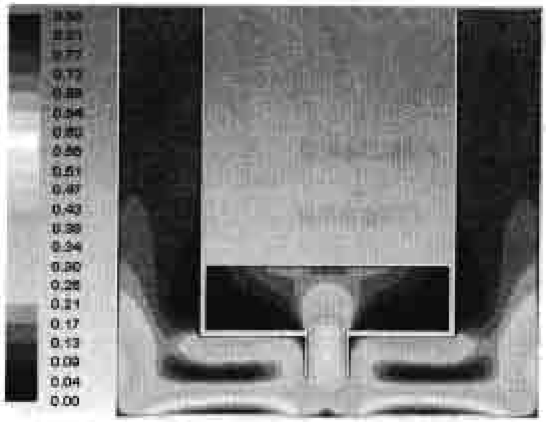


图 9-61 0.8s 时的压强云图

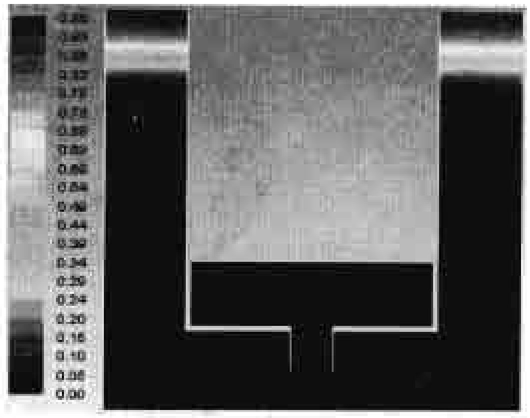


图 9-62 0.8s 时的空气体积分数云图

9.6 实例·练习——齿轮泵内流体流动

齿轮泵适用于输送不含固体颗粒和纤维、无腐蚀性的润滑油或性质类似润滑油的其他液体，以及用于液压传动系统。它是容积泵的一种，由两个齿轮、泵体与前后盖组成两个封闭空间，当齿轮转动时，齿轮脱开侧的空间的体积从小变大，形成真空，将液体吸入，齿轮啮合侧的空间的体积从大变小，而将液体挤入管路中去，其吸入腔与排出腔是靠两个齿轮的啮合线来隔开的，如图 9-63 所示。大流量齿轮油泵现主要用于油田、油库、港口、码头和船舶等大流量输油、卸油，在实践中具有不可替代的作用。

本例模拟齿轮泵内油品的流动，其模数为 3，齿轮数为 10，变位系数为 0.5，压力角为 20，齿轮转速为 420r/min，具体尺寸如图 9-64 所示。油流从上方进入，下方流出。油的密度为 960kg/m^3，粘性系数为 0.048Pa·s。



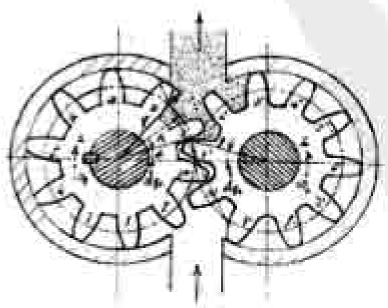


图 9-63 齿轮泵

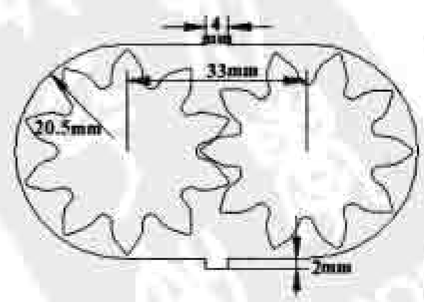


图 9-64 齿轮泵计算区域尺寸

【思路分析】

齿轮泵的几何模型可以借助 CAXA 电子图板来绘制，计算网格采用非结构网格，建立好的网格模型导入 FLUENT 后，可通过边界型函数（Profile）来定义左右两个齿轮的转动，并启用动网格模型，具体的操作流程如图 9-65 所示。

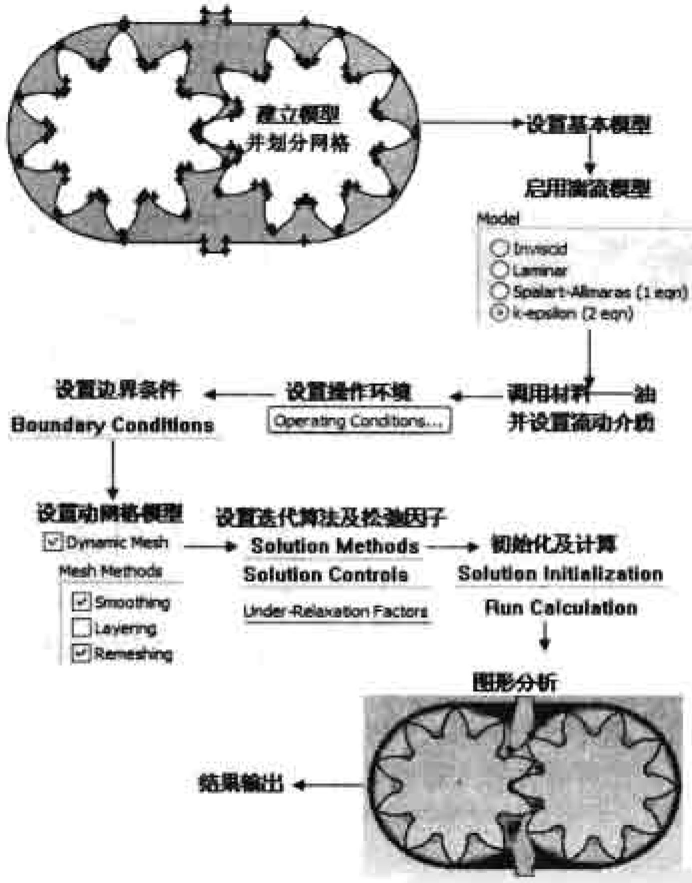


图 9-65 齿轮泵内流体流动模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch9\9-6.msh 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch9\9-6.cas，9-6.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch9\9-6.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 12 2D 解算器。

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中选择 9-6.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，网格加载如图 9-66 所示。

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在展开的面板中单击 Scale 命令，弹出如图 9-67 所示的 Scale Mesh 对话框，查看模型的尺寸范围后，单击 Close 按钮，关闭对话框。

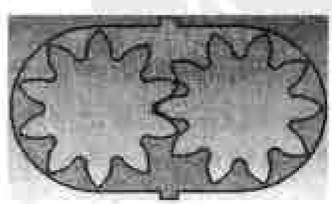


图 9-66 网格

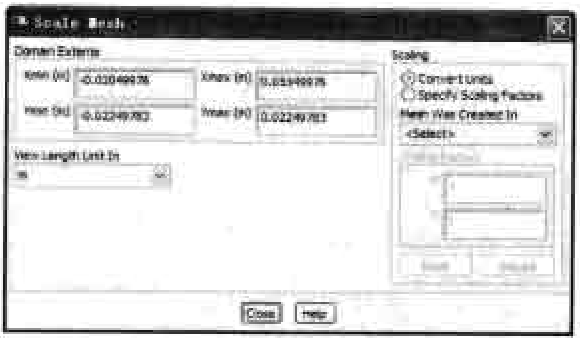


图 9-67　Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本窗口中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）在 General 面板的 Solver 栏中选择 Time 为 Transient，如图 9-68 所示。

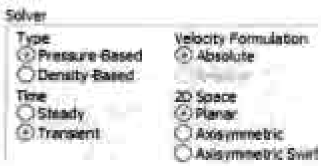


图 9-68　模型基本设置

（6）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框，选中 k-epsilon(2 eqn)单选按钮，并选择 k-epsilon Model 为 Standard，如图 9-69 所示，单击 OK 按钮。

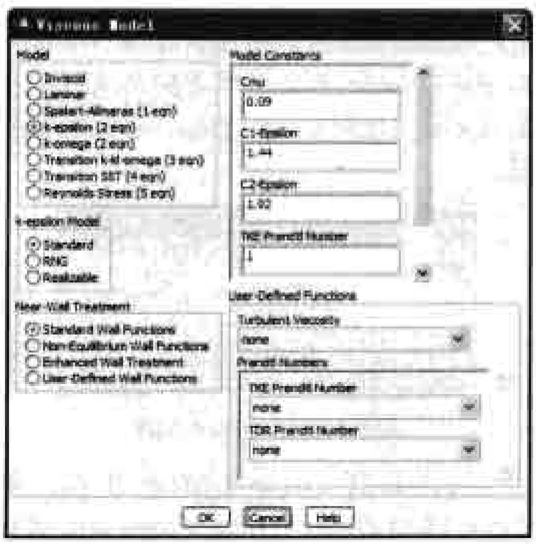


图 9-69　湍流模型设置

（7）单击 Materials 面板中的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框，单击 FLUENT Database 按钮，弹出如图 9-70 所示的 FLUENT Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表框中的 fuel-oil-liquid 选项，单击 Copy 按钮。回到 Create/Edit Materials 对话框，即可看到流体材料下拉列表框中已经有空气和油两种材料，单击 Close 按钮，关闭 Create/Edit Materials 对话框。



图 9-70　FLUENT Database Materials 对话框

（8）选择 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，选择打开面板中的 fluid 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 9-71 所示的 Fluid 对话框，在 Material Name 下拉列表框中选择 fuel-oil-liquid 选项，单击 OK 按钮。



图 9-71　介质材料设置

（9）单击 Cell Zone Conditions 面板右下角的 Operating Conditions 按钮，弹出如图 9-72 所示的操作环境设置对话框，设置 Reference Pressure Location 的 X(m)为 0.0205、Y(m)为 0.025，单击 OK 按钮。

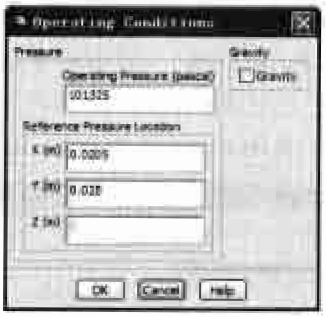


图 9-72　操作环境设置对话框

（10）选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，在 Boundary Conditions 面板中选择 in 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Pressure Inlet 对话框，如图 9-73 所示，保持总压和静压都为 0，选择 Turbulence 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Turbulent Intensity (%)为 5、Hydraulic Diameter(m)为 0.004，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板中选择 out 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 9-74 所示的 Pressure Outlet 对话框，保持总压为 0，选择 Turbulence 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，设置 Backflow Turbulent Intensity(%)为 5、Backflow Hydraulic Diameter(m) 为 0.004，单击 OK 按钮。

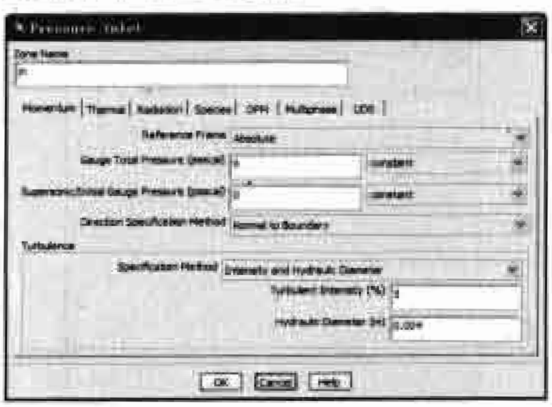


图 9-73　压力进口设置

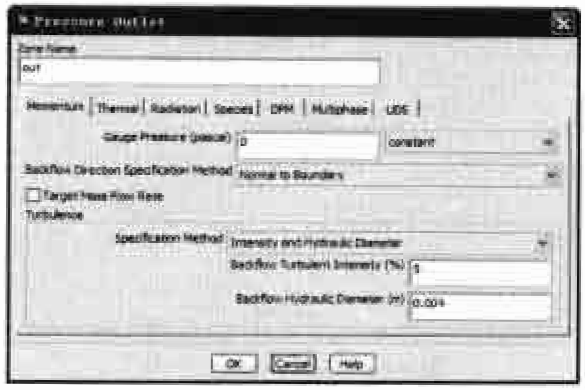


图 9-74　压力出口设置

（11）选择 Problem Setup 下的 Dynamic Mesh 选项，弹出如图 9-75 所示的 Dynamic Mesh 面板，选中 Dynamic Mesh 复选框，并在 Mesh Methods 栏中选中 Smoothing 和 Remeshing 复选框。

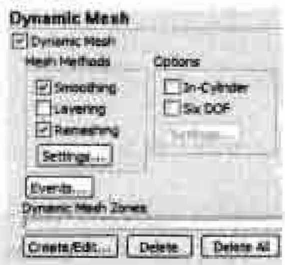


图 9-75　Dynamic Mesh 面板

（12）选择 Define→Profiles 命令，弹出如图 9-76 所示的 Profiles 对话框，单击 Read 按钮，在工作目录中找到 right.txt 和 left.txt，读入后可在 Profile 列表框中看到其高亮显示。单击 Apply 按钮和 Close 按钮，关闭 Profiles 对话框。



图 9-76　Profiles 对话框

（13）回到 Dynamic Mesh 面板，单击 Dynamic Mesh Zones 栏中的 Create/Edit 按钮，弹出如图 9-77 所示的 Dynamic Mesh Zones 对

话框。在 Zone Names 下拉列表框中选择 w_l 选项，设置其 Type 为 Rigid Body，并在 Motion Attributes 选项卡中选择 Motion UDF/Profile 为 left。然后选择 Meshing Options 选项卡，设置邻接区域的网格尺寸均为 0.0002m，单击 Create 按钮。接着在 Zone Names 下拉列表框中选择 w_r 选项，设置其 Type 也为 Rigid Body（刚性运动），选择 Motion UDF/Profile 为 right，并设置 Center of Gravity Location 栏中的 X(m)为 0.033，其余保持为 0，如图 9-78 所示。同样，在 Meshing Options 选项卡中设置其邻接区域的网格尺寸也为 0.0002m，单击 Create 按钮。定义好的动网格区域均呈现在 Dynamic Mesh 面板的 Dynamic Mesh Zones 列表框中，如图 9-79 所示。

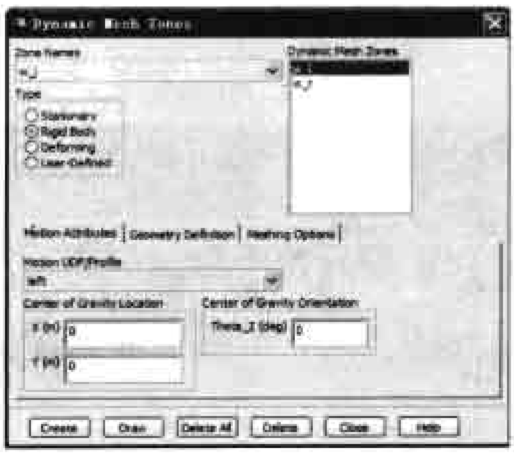


图 9-77 左齿轮运动定义

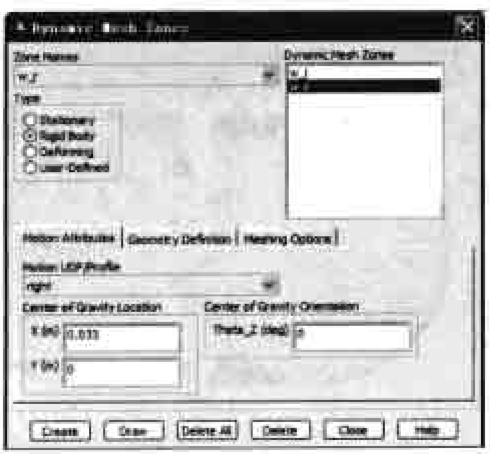


图 9-78 右齿轮运动定义

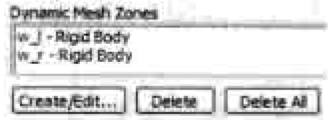


图 9-79 定义好的动网格区域

（14）在 Dynamic Mesh 面板中单击 Mesh Methods 栏中的 Settings…按钮，弹出 Mesh Method Settings 对话框，设置 Smoothing 和 Remeshing 参数，如图 9-80 和图 9-81 所示。

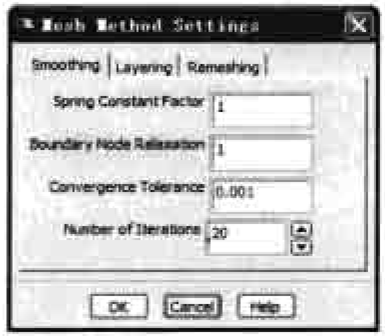


图 9-80 Smoothing 参数定义

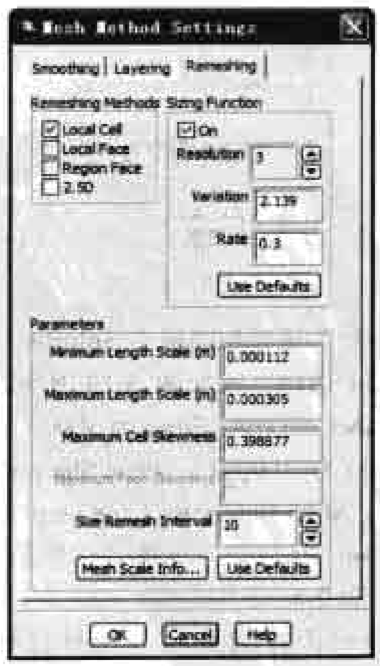


图 9-81 Remeshing 参数设置

（15）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，保持默认的算法设置。选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开

Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置。

（16）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在展开的面板中选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Residual Monitors 对话框，保持默认的精度设置，单击 OK 按钮。

（17）选择 Solution Initialization 面板中的 Compute from 为 all-zones，如图 9-82 所示，单击 Initialize 按钮。

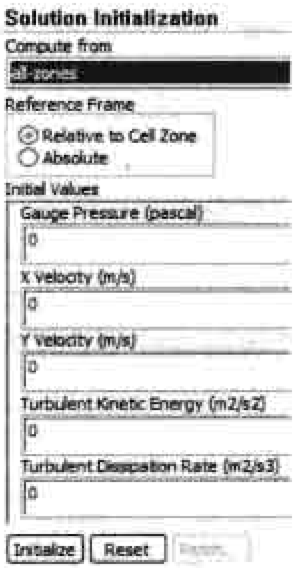


图 9-82　初始化

（18）选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 9-83 所示的面板中设置 Number of Time Steps 为 3000，设置 Time Step Size(s) 为 0.0001、Time Stepping Method 为 Fixed、Max Iterations/Time Step 为 60，单击 Calculate 按钮开始计算。计算结束后的残差曲线如图 9-84 所示。

（19）计算结束后，选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的面板中双击 Contours 选项，弹出 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Velocity...和 Velocity Magnitude 选项，单击 Display 按钮，可得到如图 9-85 所示的速度云图。若在 Contours of 栏中选择 Pressure... 和 Static Pressure 选项，单击 Display 按钮，可得到如图 9-86 所示的压强云图。



图 9-83　迭代设置

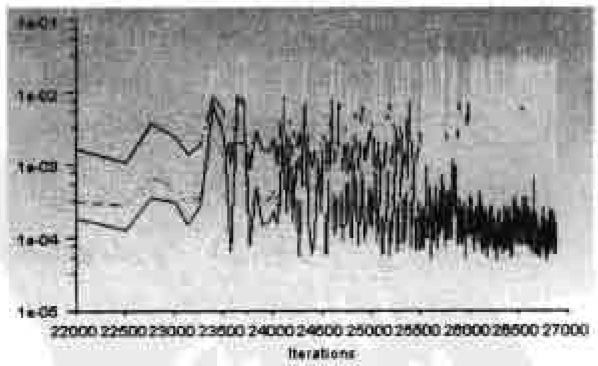


图 9-84　残差曲线

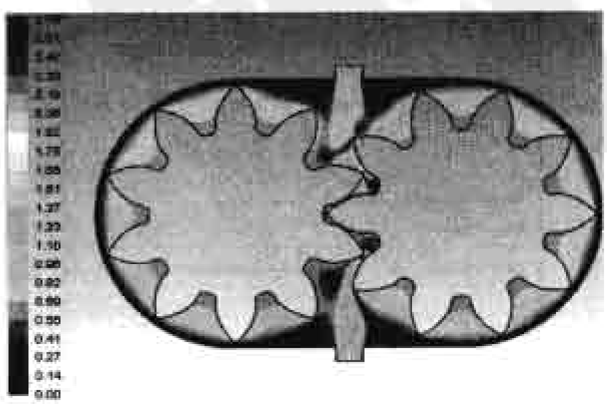


图 9-85　速度云图

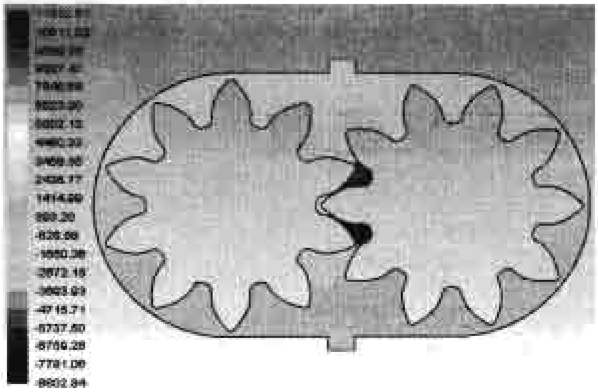


图 9-86　压强云图

（20）双击 Graphics and Animations 面板中的 Vectors 选项，弹出如图 9-87 所示的 Vectors 对话框，选择 Color by 为 Velocity... 和 Velocity Magnitude，设置矢量形式 Style 为 arrow，并设置其 Scale 为 8、Skip 为 4，其余保持默认设置，单击 Display 按钮，得到齿轮泵内部的速度矢量图，如图 9-88 所示。

（21）图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（9-6.cas 和 9-6.dat）。

（22）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

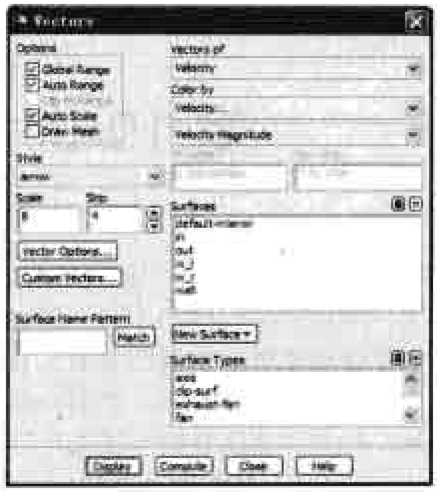


图 9-87　Vectors 对话框

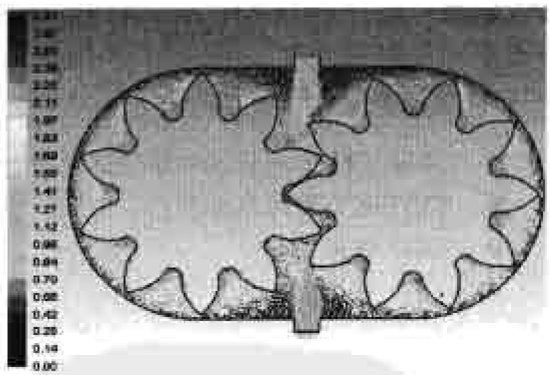


图 9-88　速度矢量图

第 10 讲　用户自定义函数

对于一些复杂问题，用户需要借助自定义函数——UDF。UDF 用 C 语言编写，使用 DEFINE 宏来定义，可以使用标准的 C 语言库函数，也可以使用 FLUENT 提供的预定义宏，通过这些预定义宏可以获得求解器得到的数据。自定义函数通过解释或编译导入 FLUENT 中使用，主要用于定制边界条件、材料属性、表面和体积反应率、源项函数等。尽管 UDF 在 FLUENT 中有广泛的用途，但是并非所有的情况都可以使用 UDF，它并不能访问所有的变量及 FLUENT 模型。

本讲主要介绍 UDF 的基础知识，包括 UDF 宏及 UDF 的解释与编译，并通过 3 个实例的讲解帮助读者掌握 UDF 的基本用法及相关操作过程。

本讲内容

- 实例·模仿——入口非匀速管流
- FLUENT 的网格拓扑
- UDF 基础
- UDF 宏
- UDF 解释与编译
- 实例·操作——液体蒸发
- 实例·练习——物体受冲运动







10.1　实例·模仿——入口非匀速管流

实际管流大多属于非均匀流，管内流速随时间或空间发生持续变化，如非恒定流、紊流等，如图 10-1 所示。FLUENT 默认的速度进口边界是匀速的，这与实际相悖，势必会造成下游流场分布失真。若想较好地解决这一问题，需要求助于自定义函数（UDF）。

本例即利用 UDF 函数，模拟管道入口速度随时间发生周期变化的管流（入口速度满足关系式：v=5+sin(10t)），管道具体尺寸如图 10-2 所示，管内流体为水。

【思路分析】

根据入口速度分布编写 C 语言源程序，导入 FLUENT 用于速度入口边界条件的设置。由于问题为非恒定流，故需采用非定常模型，且管内流速较大，流态属于湍流，还需调用湍流模型。具体的操作流程如图 10-3 所示。

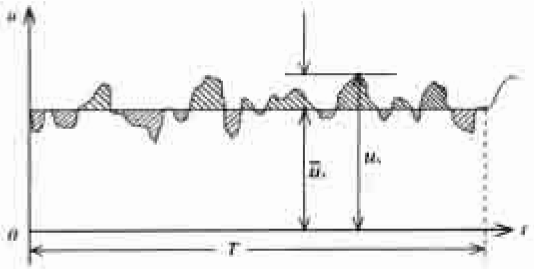


图 10-1　非匀速



图 10-2　管流计算模型尺寸

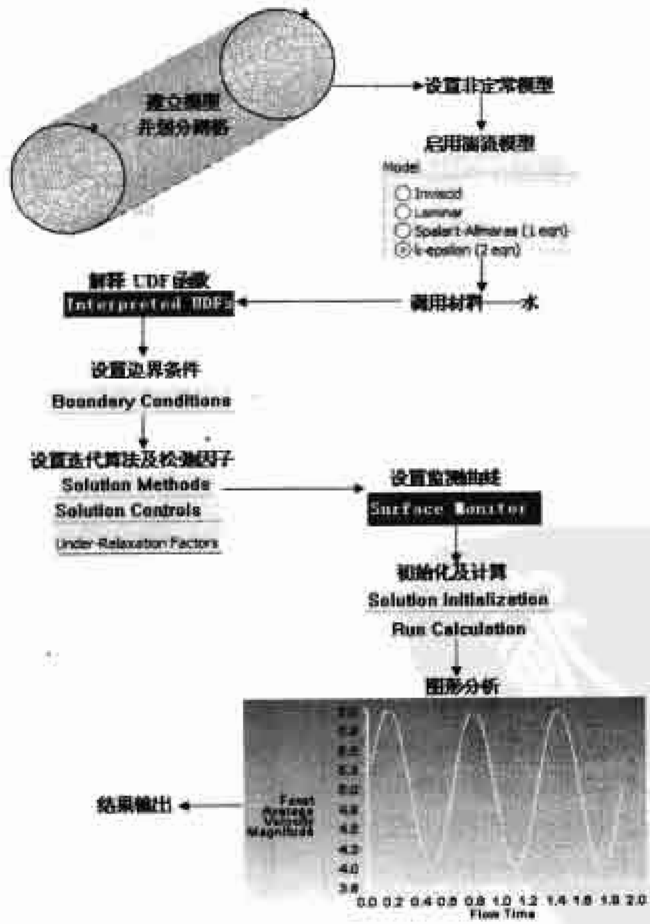


图 10-3　入口非匀速管流模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch10\10-1.msh，unsteady_velocity.c 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch10\10-1.cas，10-1.dat，surf-mon-1.out 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch10\10-1.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 三维解算器，如图 10-4 所示。

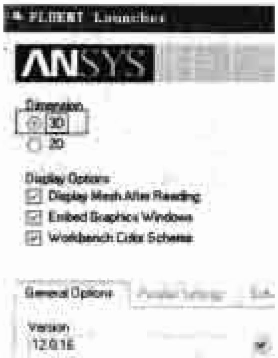


图 10-4　启动 3D 解算器

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中找到 10-1.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，导入后的网格如图 10-5 所示。

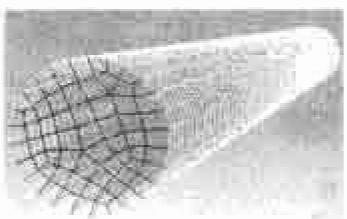


图 10-5　计算网格

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在打开的面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，如图 10-6 所示，对话框中显示了模型的尺寸范围，这里无须改动，单击 Close 按钮，关闭对话框。

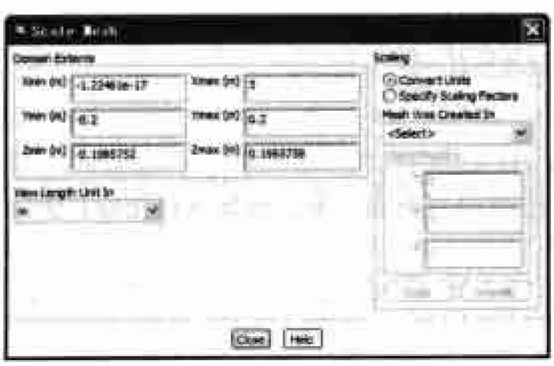


图 10-6　Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）Solver 栏中的选项用于基本模型的设置，这里选择 Time 为 Transient。

（6）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，双击 Viscous-Laminar 选项，弹出 Viscous Model 对话框。选中 k-epsilon(2 eqn)单选按钮，并选择 k-epsilon Model 中的 Standard，单击 OK 按钮。

（7）选择 Problem Setup 下的 Materials 选项，单击 Materials 面板中的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框。在对话框中单击 FLUENT Database 按钮，弹出如图 10-7 所示的 FLUENT Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表框中的 water-liquid(h2o<1>)选项，单击 Copy 按钮。回到 Create/Edit Materials 对话框，单击 Close 按钮。

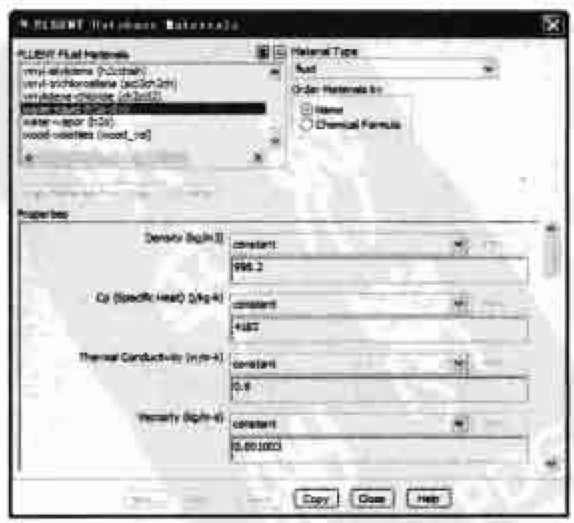


图 10-7　FLUENT Database Materials 对话框

（8）选择 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，在展开的面板中单击 Edit 按钮，弹出 Fluid 对话框，在 Material Name 下拉列表框中选择 water-liquid 选项，单击 OK 按钮。

（9）选择 Define→User-Defined→Functions→Interpreted 命令，弹出如图 10-8 所示的 Interpreted UDFs 对话框，在 Source File Name 文本输入框中输入“unsteady_velocity.c”，选中 Display Assembly Listing 复选框，单击 Interpret 按钮，即对速度入口函数进行解释，文本界面同时显示解释信息列表。

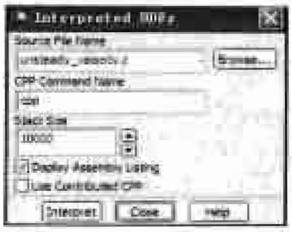


图 10-8　Interpreted UDFs 对话框

（10）解释完后，选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，在展开的面板中首先选择 in 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 10-9 所示的 Velocity Inlet 对话框，在 Velocity Magnitude(m/s)右侧的下拉列表框中选择 udf unsteady_velocity 选项，即采用自定义的速度入口函数。设置 Turbulence 的方式为 Intensity and Hydraulic Diameter，其中 Turbulence Intensity(%)为 1、Hydraulic Diameter (m)为 0.4，单击 OK 按钮。接着选中 Boundary Conditions 面板的列表框中的 out 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 10-10 所示的 Pressure Outlet 对话框，保持总压为 0，湍流方式同入口，单击 OK 按钮。

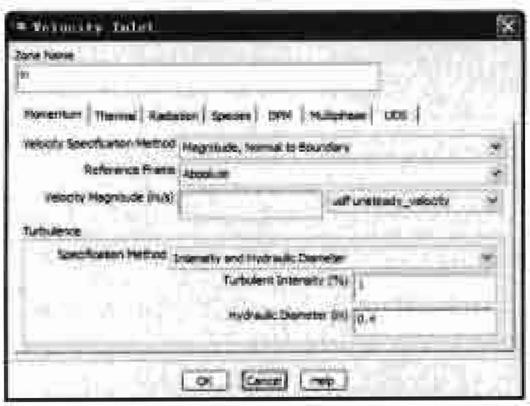


图 10-9　进口边界设置

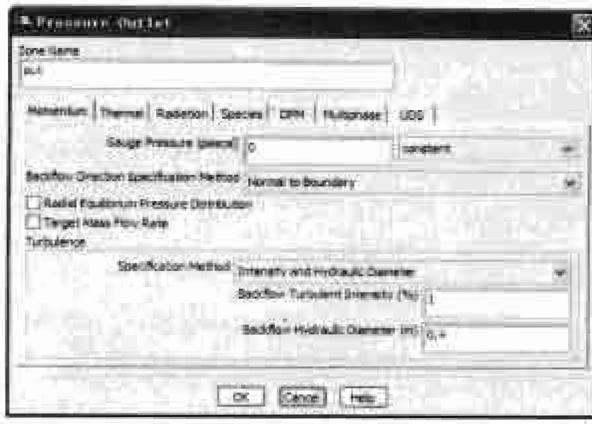


图 10-10　压力出口边界设置

（11）单击 Cell Zone Conditions 面板右下角的 Operating Conditions 按钮，弹出操作环境设置对话框，这里保持默认设置，单击 OK 按钮。

（12）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，保持默认的算法设置。选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子设置。

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，单击展开面板中 Surface Monitors 栏中的 Create 按钮，弹出如图 10-11 所示的 Surface Monitor 对话框。保持默认的 Name 为 surf-mon-1，选中 Options 栏中的 Print to Console、Plot 和 Write 复选框，并设置 Window 为 2，即在第二个视图窗口中显示监测的信息。设置 X Axis（*X* 轴）为 Flow Time、Get Data Every 为 Time Step。然后在 Report Type 下拉列表框中选择 Facet Average 选项，在 Field Variable 下拉列表框中选择 Velocity... 和 Velocity Magnitude 选项，在 Surfaces 列表框中选择 out 选项，单击 OK 按钮。

（14）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Initialization 选项，选择展开面板中 Compute from 为 in，单击 Initialize 按钮，完成计算初始化，如图 10-12 所示。



图 10-11　Surface Monitor 对话框

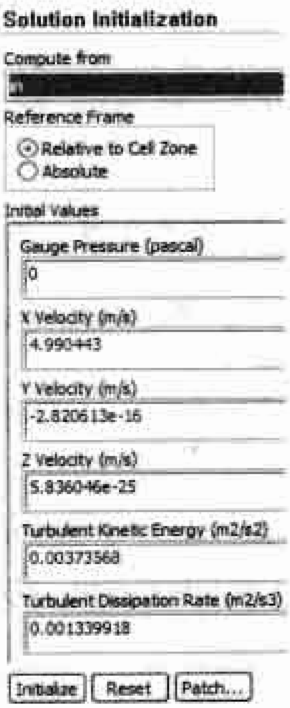


图 10-12　初始化

（15）初始化完后就可以开始迭代计算了，选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 10-13 所示的面板中设置 Number of Time Steps 为 60，设置 Time Step Size(s) 为 0.0314、Time Stepping Method 为 Fixed、Max Iterations/Time Step 为 20，单击 Calculate 按钮开始计算。计算结束后的残差曲线如图 10-14 所示。出口的速度监测曲线如图 10-15 所示。



图 10-13　迭代次数设置

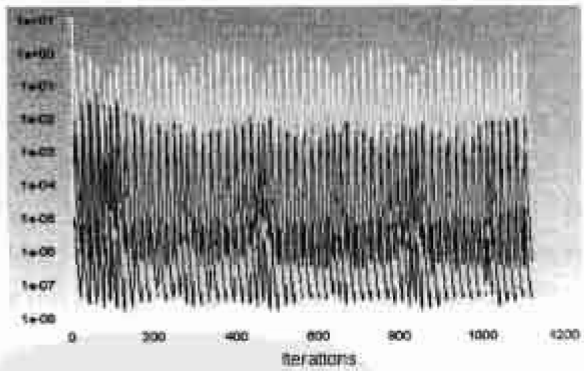


图 10-14　残差曲线

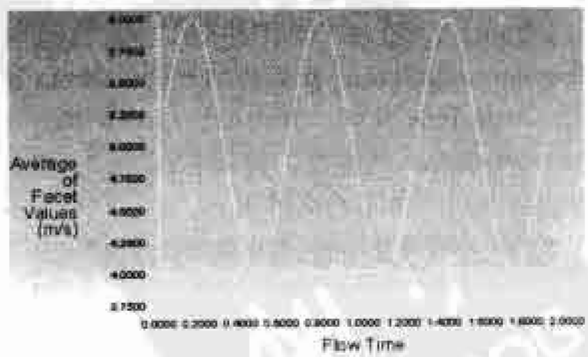


图 10-15　出口速度监测曲线

（16）定义过管轴的剖面，选择 Surface→Plane 命令，弹出 Plane Surface 对话框，利用 3 点生成一个面，在 Points 栏中输入 3 点坐标，并定义 New Surface Name 为 zh，如图 10-16 所示，单击 Create 按钮。

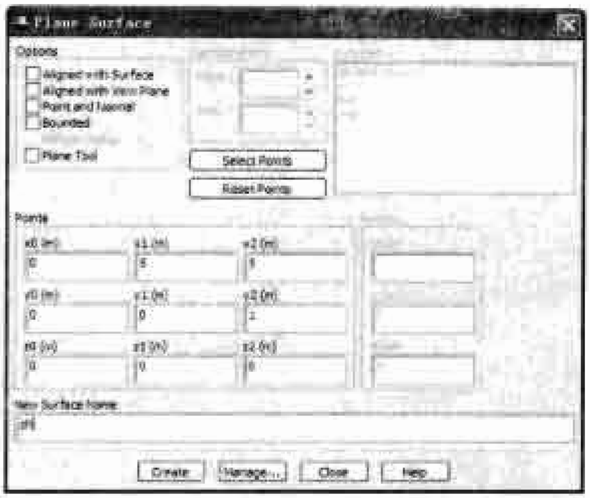


图 10-16　建立轴向剖面

（17）双击 Graphics and Animations 面板中的 Contours 选项，弹出 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Pressure…和 Static Pressure 选项，并选择显示的面为 zh，单击 Display 按钮，即可看到如图 10-17 所示的压强云图。



图 10-17　压强云图

（18）图形分析完后，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（10-1.cas 和 10-1.dat）。

（19）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

10.2　FLUENT 的网格拓扑

流场网格由大量控制体或单元构成，每个单元是由一组网格点（或节点）、一个单元中心和包围这个单元的面所定义的，如图 10-18 所示。FLUENT 使用内部数据结构定义网格的域，并将单元、单元面和网格中的节点按序排列，从而建立相邻单元之间的连通性。线程是 FLUENT 中数据结构的内部名称，它用来表示一个（边界或单元）区。单元线程是单元的组合，面线程是面的组合。域是 FLUENT 中数据结构的内部名称，它被用来表示网格中的节点、面和单元线程的组合。

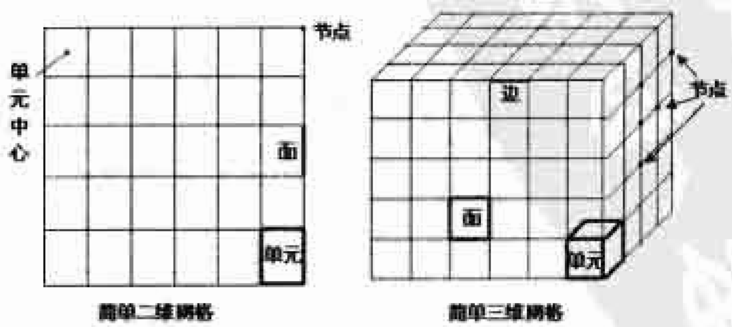


图 10-18　网格组分

单元和单元面组成代表流场各个部分的区域（进口、出口、壁面和流动区域等）。一个面围住的是一个还是两个单元（用 c0 和 c1 加以识别）取决于它是一个边界面还是一个内部面。如果是边界面，那么仅有 c0 存在（对于一个边界面，不定义 c1）。如果是内部面，则需要同时定义 c0 和 c1 单元。一个面两侧的单元可以属于同一个单元线程，也可以属于另一个单元线程。

FLUENT 的网格拓扑术语介绍如下。

- 单元（cell）：含有控制体的分离域。
- 单元中心（cell center）：存储单元数据的位置。
- 面（face）：单元（二维或三维）的边界。
- 边（edge）：面（三维）的边界。
- 节点（node）：网格点。
- 单元线索（cell thread）：在其中分配了材料数据和源项的单元组。
- 面线索（face thread）：在其中分配了边界数据的面组。
- 节点线索（node thread）：节点组。
- 区域（domain）：节点、面和单元线索的组合。

10.3 UDF 基础

UDF 由 C 语言编写，可以被 FLUENT 求解器动态地加载，从而增强 FLUENT 软件的现有功能。UDF 通过 DEFINE 宏定义，所定义的函数使用预定义宏和函数从 FLUENT 求解器中访问数据。每一个 UDF 都要在程序的开头包含 udf.h 文件（#include "udf.h"），使得在程序编译过程中，DEFINE 宏以及其他由 FLUENT 提供的宏和函数所定义的内容都能被引用。在 FLUENT 中，UDF 作为解释或编译的函数被执行，可以完成各种不同的任务。如果它们在 udf.h 文件中没有被定义为 void，那么可以返回一个值。如果它们没有返回一个值，还可以修改一个哑元，或修改一个没有被作为哑元传递的变量，或者借助算例文件和数据文件执行输入/输出任务。概括地说，UDF 能够完成下列任务：

- 返回一个值。
- 修改一个哑元。
- 返回一个值同时修改一个哑元。
- 修改一个没被作为一个哑元进行传递的变量。
- 从算例文件或数据文件中写入或读出信息。

UDF 允许对 FLUENT 进行特殊设置以便满足建模的特殊需要，其实际应用如下：

- 重新设置边界条件、材料特性、表面和体积反应速率、FLUENT 输运方程中的源项，自定义标量（UDS）输运方程中的源项和扩散函数等。
- 在每次迭代计算后调整计算结果。
- 解的初始化。
- 根据计算要求，非同步执行 UDF。
- 加强后处理过程。
- 加强 FLUENT 中现有的物理模型（如离散相模型、多相混合物模型和离散点辐射模型）。

UDF 的源文件只能以扩展名.c 保存。通常源文件中只有一个 UDF 函数，但是也允许在一个文件中包含多个前后相连的 UDF 函数。源文件在 FLUENT 中既可以被解释也可以被编译。对于解释型的 UDF，源文件将直接被加载和解释；而对于编译型的 UDF，则首先要建立一个共享的目标模块库，然后再把它加载到 FLUENT 中。一旦解释或编译了 UDF，相应的 UDF 名字将

会在 FLUENT 的视图窗口中出现，并且在相应的面板中通过选择这个函数将其连接到一个求解器中。

除了可以使用 C 语言数据类型编写 UDF 外，还可以直接使用 FLUENT 指定的与求解器数据有关的数据类型。常用的数据类型如下：

- Cell_t 是线索内单元标识符的数据类型，是一个识别给定线索内单元的整数索引。
- Face_t 是线索内面标识符的数据类型，是一个识别给定线索内面的整数索引。
- Thread 是单元或面的组合相关的数据容器。
- Node 是单元或面的拐角相关的数据容器。
- Domain 是 FLUENT 最高水平的数据结构，是一个与网格中所有节点、面和单元线索组合相关的数据容器。

10.4 UDF 宏

UDF 宏主要包括访问 FLUENT 变量的预定义宏、实用工具宏和常用 DEFINE 宏等。

10.4.1 访问 FLUENT 变量的预定义宏

FLUENT 提供了一系列预定义函数从求解器中读写数据，这些函数以宏的形式存放在代码中。可以存取 FLUENT 解算器中变量的预定义宏有单元宏、面宏、几何图形宏、节点宏和多相宏等。

1. 单元宏

单元宏是由求解器返回的实数变量，并且这些变量都是定义在一个单元格中的。

（1）访问单元流体变量的宏

FLUENT中可以访问的单元流体变量宏如表10-1所示。

表 10-1 在 mem.h 文件中的流体变量宏

名称（参数）	参 数 类 型	返 回 值
C_T(c,t)	cell_t c,Thread*t	温度
C_T_G(c,t)	cell_t c,Thread*t	温度梯度矢量
C_T_G(c,t)[i]	cell_t c,Thread*t, int i	温度梯度矢量的分量
C_T_RG(c,t)	cell_t c,Thread*t	改造后的温度梯度矢量
C_T_RG(c,t)[i]	cell_t c,Thread*t, int i	改造后的温度梯度矢量的分量
C_T_M1(c,t)	cell_t c,Thread*t	温度的前一次步长
C_T_M2(c,t)	cell_t c,Thread*t	温度的前两次步长
C_P(c,t)	cell_t c,Thread*t	压力
C_DP(c,t)	cell_t c,Thread*t	压力梯度矢量
C_DP(c,t)[i]	cell_t c,Thread*t,int i	压力梯度矢量的分量
C_U(c,t)	cell_t c,Thread*t	*u* 方向的速度

续表

名称（参数）	参数类型	返回值
C_V(c,t)	cell_t c,Thread*t	v 方向的速度
C_W(c,t)	cell_t c,Thread*t	w 方向的速度
C_YI(c,t,i)	cell_t c,Thread*t, int i	物质质量分数
C_K(c,t)	cell_t c,Thread*t	湍流运动能
C_D(c,t)	cell_t c,Thread*t	湍流运动能的分散速率

表 10-1 中有_G、_RG、_M1、_M2 下标的单元格温度的宏可应用于除了单元格压力（C-P）外的所有求解器的变量中，这几个下标分别表示矢量梯度、改造的矢量梯度、前一次的步长和前两次的步长。而对于单元格压力，它的矢量梯度和相应的分量是使用 C_DP 得到的，而不是 C_P_G。每一个下标的描述和用法如下。

- 读写梯度矢量及其分量：在宏中加入下标_G 可以得到梯度矢量和它的分量，如 C_T_G(c,t)可以返回单元格的温度梯度矢量。需要注意的是，只有当已经求解出包含这个变量的方程时才能得到梯度变量。例如，定义了一个关于能量的源程序，那么所编的 UDF 可以使用 C_T_G 来读写单元格的温度梯度，而不能使用 C_U_G 读写 X 方向的速度分量。在调用梯度矢量时把某一分量作为参数，这样就可以得到梯度分量了，其中，参数 0 代表 X 方向的分量，1 代表 Y 方向的分量，2 代表 Z 方向的分量。例如，C_T_G(c,t)[0]可以返回温度梯度 X 方向的分量。
- 读写改造过的梯度矢量和其分量：通过加下标_RG 可以在宏中得到改造过的梯度矢量和其分量。通过使用恰当的整数作为参数来获得想要的矢量分量。当完成自己的插补计划时可以使用改造过的梯度。改造过的温度梯度和其分量在表 10-1 中列出，可以推广到所有的变量。需要注意的是，改造过的梯度矢量和梯度矢量一样都只有在梯度方程被求解出来时才可以得到。
- 读写前一次步长时间下的变量值：在宏中加入下标_M1 就可以得到前一次步长时间下（$t-\Delta t$）的变量值，得到的这些数据可以在瞬态模拟中使用。例如，C_T_M1(c,t)可以返回前一步时间下的单元格温度的值。
- 读写前两次步长时间下的变量值：若在宏中加入下标_M2 就可以得到前两次步长时间下（$t-2\Delta t$）的变量值。

（2）访问速度导数的宏

用于读写速度导数的宏如表 10-2 所示。

表 10-2　在 mem.h 文件中访问导数的宏

名称（参数）	参数类型	返回值
C_DUDX(c,t)	cell_t c,Thread*t	U 速度对 X 方向的导数
C_DUDY(c,t)	cell_t c,Thread*t	U 速度对 Y 方向的导数
C_DUDZ(c,t)	cell_t c,Thread*t	U 速度对 Z 方向的导数
C_DVDX(c,t)	cell_t c,Thread*t	V 速度对 X 方向的导数
C_DVDY(c,t)	cell_t c,Thread*t	V 速度对 Y 方向的导数
C_DVDZ(c,t)	cell_t c,Thread*t	V 速度对 Z 方向的导数
C_DWDX(c,t)	cell_t c,Thread*t	W 速度对 X 方向的导数

续表

名称（参数）	参数类型	返回值
C_DWDY(c,t)	cell_t c,Thread*t	W 速度对 Y 方向的导数
C_DWDZ(c,t)	cell_t c,Thread*t	W 速度对 Z 方向的导数

（3）访问材料性质的宏

用于存取材料性质的宏如表 10-3 所示。

表 10-3　在 mem.h 文件中存取材料性质的宏

名称（参数）	参数类型	返回值
C_FMEAN(c,t)	cell_t c,Thread*t	第一次混合分数的平均值
C_FMEAN2(c,t)	cell_t c,Thread*t	第二次混合分数的平均值
C_FVAR(c,t)	cell_t c,Thread*t	第一次混合分数变量
C_FVAR2(c,t)	cell_t c,Thread*t	第二次混合分数变量
C_PREMIXC(c,t)	cell_t c,Thread*t	反应过程变量
C_LAM FLAME SPEED(c,t)	cell_t c,Thread*t	层流焰速度
C_CRITICAL STRAIN RATE(c,t)	cell_t c,Thread*t	临界应变速度
C_POLLUT(c,t)	cell_t c,Thread*t, int i	第 i 个污染物的质量分数
C_R(c,t)	cell_t c,Thread*t	密度
C_MU L(c,t)	cell_t c,Thread*t	层流速度
C_MU T(c,t)	cell_t c,Thread*t	湍流速度
C_MU EFF(c,t)	cell_t c,Thread*t	有效粘度
C_K_L(c,t)	cell_t c,Thread*t	热传导系数
C_K_T(c,t)	cell_t c,Thread*t	湍流热传导系数
C_K_EFF(c,t)	cell_t c,Thread*t	有效热传导系数
C_CP(c,t)	cell_t c,Thread*t	确定的热量
C_RGAS(c,t)	cell_t c,Thread*t	气体常数
C_DIFF L(c,t)	cell_t c,Thread*t, int i，int j	层流物质的扩散率
C_DIFF EFF(c,t)	cell_t c,Thread*t, int i	物质的有效扩散率
C_ABS COEFF(c,t)	cell_t c,Thread*t	吸附系数
C_SCAT COEFF(c,t)	cell_t c,Thread*t	扩散系数
C_NUT(c,t)	cell_t c,Thread*t	湍流速度

（4）访问用户自定义的单元标量和存储器的宏

可以访问用户自定义的单元标量和存储器的宏如表 10-4 所示。

表 10-4　在 mem.h 文件中访问用户自定义的单元标量和存储器的宏

名称（参数）	参数类型	返回值
C_UDSI(c,t)	cell_t c,thread*t,int i	用户定义的单元格标量
C_UDSI M(c,t)	cell_t c,thread*t,int i	前一次步长下用户定义的单元格标量
C_UDSI_DIFF(c,t)	cell_t c,thread*t,int i	用户定义的标量单元格分散率
C_UDMI(c,t)	cell_t c,thread*t,int i	用户定义的单元格存储器

（5）访问雷诺兹压力模型的宏

可以访问雷诺兹压力模型读写变量的宏如表 10-5 所示。

表 10-5　在 mem.h 文件中访问雷诺兹压力模型读写变量的宏

名称（参数）	参 数 类 型	返 回 值
C_RUU(c,t)	cell_t c,Thread*t	uu 雷诺兹压力
C_RVV(c,t)	cell_t c,Thread*t	vv 雷诺兹压力
C_RWW(c,t)	cell_t c,Thread*t	ww 雷诺兹压力
C_RUV(c,t)	cell_t c,Thread*t	uv 雷诺兹压力
C_RVW(c,t)	cell_t c,Thread*t	vw 雷诺兹压力
C_RUW(c,t)	cell_t c,Thread*t	uw 雷诺兹压力

2．面宏

面宏是在单元格的边界面上定义的，并且从求解器中返回一个真值，该类宏仅可在偏析求解器中使用。

（1）访问面流体变量的宏

在表 10-6 中列出的宏可以在边界面读写流体变量。注意，如果表面在边界上，那么流体的方向是由 F_FLUX 决定的点指向外围空间的。

表 10-6　在 mem.h 文件中访问面流体变量的宏

名称（参数）	参 数 类 型	返 回 值
F_R(f,t)	face_t f,Thread*t	密度
F_P(f,t)	face_t f,Thread*t	压力
F_U(f,t)	face_t f,Thread*t	*u* 方向的速度
F_V(f,t)	face_t f,Thread*t	*v* 方向的速度
F_W(f,t)	face_t f,Thread*t	*w* 方向的速度
F_T(f,t)	face_t f,Thread*t	温度
F_H(f,t)	face_t f,Thread*t	焓
F_K(f,t)	face_t f,Thread*t	湍流运动能
F_D(f,t)	face_t f,Thread*t	湍流运动能的分散速率
F_YI(f,t,i)	face_t f,Thread*t,int i	物质的质量分数
F_FLUX(f,t)	face_t f,Thread*t	通过边界表面的质量流速

（2）访问用户自定义的面标量和存储器的宏

可以访问用户自定义的面标量和存储器的宏如表 10-7 所示。

表 10-7　在 mem.h 文件中访问用户自定义的面标量和存储器的宏

名称（参数）	参 数 类 型	返 回 值
F_UDSI(f,t,i)	face_t f,Thread*t,int i	用户确定的表面标量
F_UDMI(f,t,i)	face_t f,Thread*t,int i	用户定义的表面存储器

（3）访问混合面变量的宏

可以访问混合面变量的宏如表 10-8 所示。

表 10-8　在 mem.h 文件中访问混合面变量的宏

名称（参数）	参 数 类 型	返 回 值
F_C0(f,t)	face_t f,Thread*t	访问表面\0 边上的单元变量
F_C0_THREAD(f,t)	face_t f,Thread*t	访问表面\0 边上的单元线索
F_C1(f,t)	face_t f,Thread*t	访问表面\1 边上的单元变量
F_C1_THREAD(f,t)	face_t f,Thread*t	访问表面\1 边上的单元线索

3. 几何图形宏

几何图形宏是为了在 FLUENT 中重新得到几何变量，包括节点和面的数量、重心、表面积及体积等，如表 10-9 所示。

表 10-9　在 mem.h 文件中的几何图形宏

名称（参数）	参 数 类 型	返 回 值
C_NNODES(c,t)	cell_t c,Thread*t	一个单元格中的节点数
C_NFACES(c,t)	cell_t c,Thread*t	一个单元格中的表面数
C_NNODES(f,t)	face_t f,Thread*t	一个表面中的节点数
C_CENTROID(x,c,t)	real x[ND_ND],cell_t c,Thread*t	单元格重心的 x 值
C_CENTROID(x,f,t)	real x[ND_ND],face_t f,Thread*t	表面中心的 x 值
C_AREA(A,f,t)	Ax[ND_ND],face_t f,Thread*t	面积向量 A
C_VOLUME(c,t)	cell_t c,Thread*t	二维或三维的单元格体积（单元格体积除以 2π 是轴对称模型的体积）

4. 节点宏

节点宏主要返回单元格节点的实数直角坐标和相应的节点速度分量，如表 10-10 所示。

表 10-10　在 mem.h 文件中的节点宏

名称（参数）	参 数 类 型	返 回 值
NODE_X(node)	Node*node	节点的 X 坐标
NODE_Y(node)	Node*node	节点的 Y 坐标
NODE_Z(node)	Node*node	节点的 Z 坐标
NODE_GX(node)	Node*node	节点速度的 X 分量
NODE_GY(node)	Node*node	节点速度的 Y 分量
NODE_GZ(node)	Node*node	节点速度的 Z 分量

5. 多相宏

表 10-11 给出了返回一个与整体多相节点相连的实数变量宏。

表 10-11　在 sg_mphase.h 中的变量宏

名称（参数）	参 数 类 型	返 回 值
C_VOF(c,pt[0])	cell_t c,Thread*pt	主要相的体积分数
C_VOF(c,pt[n])	cell_t c,Thread*pt	第 n 个辅助相的体积分数

10.4.2 实用工具宏

FLUENT 提供了针对其变量操作的一系列工具，这些工具中大部分可以作为宏直接执行。

1. 一般目的的循环宏

一般目的的循环宏主要完成基本的查询功能，可用于 FLUENT 单相和多相模型的 UDF 中。

（1）查询控制区的单元线

可以用 thread_loop_c 查询给定控制区的单元线，它包含单独的说明，后面是对控制区的单元线所做的操作，包含在{ }中。注意，thread_loop_c 在执行上和 thread_loop_f 相似。

```
Domain *domain;
Thread *c_thread;
thread_loop_c(c_thread, domain) /*loops over all cell threads in domain*/
  {
  }
```

（2）查询控制区的面

应用 thread_loop_f 可以查询给定控制区的面，它也包含单独的说明，后面是对控制区的面单元所做的操作，包含在{ }中。注意，thread_loop_f 在执行上和 thread_loop_c 相似。

```
Thread *f_thread;
Domain *domain;
thread_loop_f(f_thread, domain)/* loops over all face threads in a domain*/
  {
  }
```

（3）查询单元线索中的单元

可以应用 begin_c_loop 和 end_c_loop 来查询给定单元线索 c_thread 上所有的单元，它包含 begin_c_loop 和 end_c_loop 的说明，完成对单元线索中单元所做的操作，定义包含在{ }中。当查找控制区单元线索的单元时，应用的 loop 全嵌套在 thread_loop_c 中。

```
cell_t c;
Thread *c_thread;
begin_c_loop(c, c_thread)      /* loops over cells in a cell thread*/
  {
  }
end_c_loop(c, c_thread)
```

（4）查询面线索中的面

begin_f_loop 和 end_f_loop 可以用来查找给定面线索 f_thread 的所有的面，它包含 begin_f_loop 和 end_f_loop 的说明，完成对面线索中面单元所做的操作，定义包含在{ }中。当查找控制区面线索的所有面时，应用的 loop 全嵌套在 thread_loop_f 中。

```
face_t f;
Thread *f_thread;
begin_f_loop(f, f_thread)      /* loops over faces in a face thread*/
  {
```

```
  }
end_f_loop(f, f_thread)
```

（5）查询单元中的面

下面的函数用于查询给定单元中所有的面，包含单独的查询说明，后面是所做的操作，包含在{ }中。

```
face_t f;
Thread *tf;
int n;
c_face_loop(c, t, n)             /* loops over all faces on a cell */
  {
  ...
  f = C_FACE(c,t,n);
  tf = C_FACE_THREAD(c,t,n);
  ...
  }
```

这里，n 是当前节点的索引号。当前节点的索引号用在 C_FACE 宏中，以获得所有面的数量（例如，f = C_FACE(c,t,n)）。

另一个在 c_face_loop 中有用的宏是 C_FACE_THREAD，这个宏用于合并两个面线索（例如，tf = C_FACE_THREAD(c,t,n)）。

（6）查询单元节点

当想查询给定单元中所有的节点时，可以使用 c_node_loop 函数，它包含单独的查询说明，后面是所做的操作，包含在{ }中。

```
cell_t c;
Thread *t;
int n;
c_node_loop(c, t, n)
  {
  ...
  node = C_NODE(c,t,n);
  ...
  }
```

这里，n 是当前节点的索引号。当前节点的索引号用在 C_NODE 宏中，以获得所有节点的数量。

2. 多相组分查询宏

多相组分查询宏用于多相模型的 UDF 中。

（1）查询混合物中相的控制区

sub_domain_loop 宏用于查询混合物控制区的所有相的子区，并可在混合物控制区给每个相区定义指针及相关的 phase_domain_index。注意，sub_domain_loop 宏在执行中和 sub_thread_loop 宏是相似的。

```
int phase_domain_index;        */ index of subdomain pointers*/
Domain *mixture_domain;
Domain *subdomain;
sub_domain_loop(subdomain, mixture_domain, phase_domain_index)
```

sub_domain_loop 的变量是 subdomain、mixture_domain 和 phase_domain_index。

subdomain 是 phase-level domain 的指针，mixture_domain 是 mixture-level domain 的指针。当想用 DEFINE 宏时，mixture_domain（包含控制区变量，如 DEFINE_ADJUST）可通过 FLUENT 求解器自动传递给 UDF，混合物就和 UDF 相关了。如果 mixture_domain 没有显式地传递给 UDF，则应用另一个宏来恢复它。phase_domain_index 是子区指针索引号，初始相的索引号为 0，混合物中其他相则依次加 1。注意，subdomain 和 phase_domain_index 是在 sub_domain_loop 宏定义中初始化的。

（2）查询混合物的相线索

sub_thread_loop 宏用于查询所有混合物等值线的相等值线索，并返回每个子区和相关 phase_domain_index 的指针。如果 subthread 指针与进口区域相关，那么这个宏将提供给进口区域每个相面线索指针。

```
int phase_domain_index;
Thread *subthread;
Thread *mixture_thread;
sub_thread_loop(subthread, mixture_thread, phase_domain_index)
```

sub_thread_loop 的自变量是 subthread、mixture_thread 和 phase_domain_index。

subthread 是相线索的指针，mixture_thread 是 mixture-level thread 的指针。当用 DEFINE 宏（包含一个线索自变量）定义时，mixture_thread 通过求解器自动传递给 UDF，使其与混合物相关。如果 mixture_thread 没有显式地传递给 UDF，则需要在调用 sub_thread_loop 之前，调用工具宏来恢复它。phase_domain_index 是子区指针索引号，可以用宏 PHASE_DOMAIN_INDEX 恢复。初始相的索引号为 0，混合物中其他相依次加 1。注意，subthread 和 phase_domain_index 是在 sub_thread_loop 宏定义中被初始化的。

（3）查询混合物中所有单元的线索

mp_thread_loop_c 宏用于查询混合物控制区所有单元的线索，提供了与混合物等值线有关的相等值线索的指针。当应用到混合物控制区时，和 thread_loop_c 宏是等价的。单元线索第 i 相的指针是 pt[i]，这里，i 是相控制区索引号 phase_domain_index。pt[i]可用作宏的自变量。相控制区索引号 phase_domain_index 可以用 PHASE_DOMAIN_INDEX 恢复。

```
Thread **pt;
Thread *cell_threads;
Domain *mixture_domain;
mp_thread_loop_c(cell_threads, mixture_domain, pt)
```

mp_thread_loop_c 的自变量是 cell_threads、mixture_domain 和 pt。

cell_threads 是网格线索的指针，mixture_domain 是 mixture-level domain 控制区的指针，pt 是含有 phase-level 线索的指针数组。

当要用包含控制区变量的宏来定义时，mixture_domain 通过求解器自动传递给 UDF，使其

与混合物相关。若 mixture_domain 没有显式地传递给 UDF，应用另一个工具宏来恢复。注意，pt 和 cell_threads 的值是由查询函数派生出来的。mp_thread_loop_c 一般用在 begin_c_loop 中，begin_c_loop 则用于查询网格线索内的所有网格。当 begin_c_loop 嵌套在 mp_thread_loop_c 中时，就可以查询混合物中相单元线索的所有网格。

（4）查询混合物中所有的相面线索

mp_thread_loop_f 用于查询混合物控制区内所有混合物等值线的面线索，并且提供每个与混合物等值线有关的相等值线索指针，在混合物控制区内，和 thread_loop_f 几乎是等价的。当需要相等值线指针时，pt[i]可以作为宏的自变量。phase_domain_index 可以用宏 PHASE_DOMAIN_INDEX 来恢复。

```
Thread **pt;
Thread *face_threads;
Domain *mixture_domain;
mp_thread_loop_f(face_threads, mixture_domain, pt)
```

mp_thread_loop_f 的自变量是 face_threads、mixture_domain 和 pt。

face_threads 是面线索的指针，mixture_domain 是混合物等值线控制区的指针。pt 是包含相等值线索的指针数组。

当要用包含控制区变量的宏来定义时，mixture_domain 通过 FLUENT 的求解器自动传递给 UDF，使其与混合物相关。若 mixture_domain 没有显式地传递给 UDF，则应用另外一个工具宏来恢复。注意，pt 和 face_threads 的值是由查询函数派生出来的。mp_thread_loop_f 一般用在 begin_f_loop 中，begin_f_loop 则用于查询网格面线索内的所有网格。当 begin_f_loop 嵌套在 mp_thread_loop_f 中时，就可以查询混合物中相单元面线索的所有网格。

3. 设置面变量的宏

F_PROFILE 宏可以设置面的变量值，当要生成边界条件的外形或存储新的变量值时，自动调用该函数，其格式如下：

```
F_PROFILE( f, t, n)
```

F_PROFILE 的自变量是 f，面的索引号是 face_t，t 为面上线索的指针，整数 n 是要在边界上设定的变量标志符。这些变量通过 FLUENT 的求解器自动传递给 UDF，不必给它们赋值。例如，进口边界包含总压和总温，两者都在 UDF 中定义。进口边界的变量在 FLUENT 中赋予整数 0，其他赋予 1。当在 FLUENT 的进口边界面板中定义边界条件时，这些整数值由求解器设定。

4. 访问没有赋值的自变量的宏

并非所有的 UDF 都直接把函数所需要的自变量传递给求解器。例如，DEFINE_ ADJUST 和 DEFINE_INIT 传递给混合物控制区变量，这里，DEFINE_ON_DEMAND 是没有被传递的自变量。下面提供了通过 DEFINE 函数访问没有被直接传递给 UDF 文件的工具。

（1）Get_Domain

若控制区指针没有显式地作为自变量传递给 UDF，可以用 Get_Domain 宏恢复控制区指针，格式如下：

```
Get_Domain(domain_id);
```

domain_id 是一个整数，对于混合物控制区，其值为 1；在多相混合物模型中，其值依次加 1。在单相流中，domain_id 为 1，Get_Domain(1)将返回流体控制区的指针。

```
DEFINE_ON_DEMAND(wode_udf)
{
  Domain *domain;               /* domain is declared as a variable */
  domain = Get_Domain(1);   /* returns fluid domain pointer */
  ...
}
```

在多相流中，Get_Domain 的返回值是混合物等值线索、单相等值线索、相等值线索或相等值线索控制区指针。domain_id 的值在混合物控制区始终是 1，可以用 FLUENT 中的图形用户界面获得。

```
DEFINE_ON_DEMAND(my_udf)
{
  Domain *mixture_domain;
  mixture_domain = Get_Domain(1);      /* returns mixture domain pointer */
                                         /* and assigns to variable*/
  Domain *subdomain;
  subdomain = Get_Domain(2); /* returns phase with ID=2 domain pointer*/
                             /* and assigns to variable*/
  ...
}
```

（2）通过相控制区索引号使用相控制区指针

有两种方法可以获得混合物控制区具体相（或子区）的指针，即宏 DOMAIN_SUB_DOMAIN 和 Get_Domain，DOMAIN_SUB_DOMAIN 有两个自变量：mixture_domain 和 phase_domain_index。这个函数返回给定 phase_domain_index 的相指针。注意，DOMAIN_SUB_DOMAIN 在执行上和 THREAD_SUB_THREAD 宏相似。

```
int phase_domain_index = 0;                /* primary phase index is 0 */
Domain *mixture_domain;
Domain *subdomain = DOMAIN_SUB_DOMAIN(mixture_domain,phase_domain_index);
```

mixture_domain 是 mixture-level domain 的指针。

当用包含控制区自变量的宏 DEFINE 时，mixture_domain 自动通过 FLUENT 的求解器传递给 UDF，UDF 就和混合物相关联了。否则，如果 mixture_domain 没有显式地传递给 UDF，则需要在调用 sub_domain_loop 之前，用另一个宏工具来恢复。

phase_domain_index 是子区指针的索引号，它是一个整数，初始相值为 0，以后每相依次加 1。当用包含相控制区变量（DEFINE_EXCHANGE_PROPERTY、DEFINE_VECTOR_EXCHANGE_PROPERTY）的 DEFINE 宏时，phase_domain_index 自动通过 FLUENT 的求解器传递给 UDF，UDF 就和互相作用的相相联系了。否则，需要硬代码调用 DOMAIN_SUB_DOMAIN 宏给 phase_domain_index 指针赋值。如果多相流模型有两相，则 phase_domain_index 初始相的值为 0，第二相的值为 1。然而，如果多相流模型中有更多的相，则需要用 PHASE_DOMAIN_

INDEX 宏来恢复与给定控制区相关的 phase_domain_index。

（3）通过相控制区索引号使用相等值线索指针

THREAD_SUB_THREAD 宏可以用来恢复给定相控制区索引号的 phase-level thread (subthread) 指针。THREAD_SUB_THREAD 有两个自变量：mixture_thread 和 phase_domain_index，这一函数返回给定 phase_domain_index 的 phase-level 线索指针。注意，THREAD_SUB_THREAD 在执行上与 DOMAIN_SUB_DOMAIN 宏相似。

```
int phase_domain_index = 0;              /* primary phase index is 0 */
Thread *mixture_thread;                  /* mixture-level thread pointer */
Thread *subthread = THREAD_SUB_THREAD(mixture_thread,phase_domain_index);
```

mixture_thread 是 mixture-level thread 线索的指针。当用包含控制区自变量宏 DEFINE 时，它会自动通过 FLUENT 的求解器传递给 UDF，这样，UDF 就和混合物相关联了。否则，如果混合物控制线索指针没有显式地传递给 UDF，则需要在调用 Lookup_Thread 宏之前，用另一个宏工具来恢复。

phase_domain_index 为子区指针的索引号。它是一个整数，初始相值为 0，以后每相依次加 1。当要用包含相控制区索引号变量的 DEFINE 宏时，phase_domain_index 通过 FLUENT 的求解器自动传递给 UDF，使 UDF 与具体的相互作用的相相关联。否则，需要用硬代码改变宏 THREAD_ SUB_THREAD 的 phase_domain_index 值。如果多相流模型中只有两相，那么 phase_domain_ index 的初始相为 0，第二相为 1。若有更多的相，则需要用 PHASE_DOMAIN_INDEX 宏来恢复与给定区域相关的 phase_domain_index。

（4）通过混合物等值线使用相线索指针数组

THREAD_SUB_THREADS 宏可用于恢复指针数组 pt，它的元素包含相等值线（子线索）的指针。THREADS_SUB_THREADS 有一个变量 mixture_thread。

```
Thread *mixture_thread;
Thread **pt;    /* initialize pt*/
pt = THREAD_SUB_THREADS(mixture_thread);
```

mixture_thread 是 mixture-level thread 代表网格线索或面线索的指针。当用包含线变量的 DEFINE 宏时，它通过 FLUENT 的求解器自动传递给 UDF，这个函数就和混合物关联了。否则，如果混合物线索的指针没有显式地传递给 UDF，则需要用另一个宏来恢复。

pt[i]数组的元素是与第 i 相的相等值线索有关的值，这里的 i 是 phase_domain_index。当想恢复网格具体相的信息时，可以用 pt[i]作为一些网格变量宏的自变量。例如，C_R(c,pt[i])可以用来返回网格点 c 第 i 相的密度。指针 pt[i]可以用 THREAD_SUB_THREADS 来恢复，用 i 作为自变量。phase_ domain_index 可以用宏 PHASE_DOMAIN_INDEX 来恢复。

（5）通过相控制区指针调用混合物控制区指针

当 UDF 有权访问特殊的相等值线索（子区）指针时，可以用宏 DOMAIN_SUPER_DOMAIN 来恢复混合物等值线索控制区指针。DOMAIN_SUPER_DOMAIN 含有一个变量 subdomain。注意，DOMAIN_SUPER_DOMAIN 在执行上和 THREAD_SUPER_THREAD 宏是非常相似的。

```
Domain *subdomain;
Domain *mixture_domain = DOMAIN_SUPER_DOMAIN(subdomain);
```

subdomain 是多相流混合物控制区相等值线索的指针。当用包含控制区变量的 DEFINE 宏时，它会通过 FLUENT 的求解器自动传递给 UDF，使函数与混合物中的第一相和第二相关联。注意，在当前的 FLUENT 版本中，DOMAIN_SUPER_DOMAIN 将返回与 Get_Domain(1)相同的指针。这样，如果 UDF 可以使用子区的指针，建议使用宏 DOMAIN_SUPER_DOMAIN 来代替 Get_Domain 宏，以避免将来的 FLUENT 版本造成不兼容的问题。

（6）通过相线索指针使用混合物线索指针

当 UDF 有权访问某一条想恢复混合物等值线索指针的子线索指针时，可以使用宏 THREAD_SUPER_THREAD。THREAD_SUPER_THREAD 有一个自变量 subthread。

```
Thread *subthread;
Thread *mixture_thread = THREAD_SUPER_THREAD(subthread);
```

subthread 在多相流混合物中是一个特殊的相等值线索指针。当使用包含线变量的 DEFINE 宏时，它通过 FLUENT 的求解器自动传递给 UDF，使函数与混合物中的两相关联。注意，THREAD_SUPER_THREAD 在执行上和 DOMAIN_SUPER_DOMAIN 宏是非常相似的。

（7）通过区的 ID 使用线索指针

当要在 FLUENT 的边界条件面板中恢复与给定区域 ID 相关的线索指针时，可以使用宏 Lookup_Thread 来实现。例如，假设 UDF 需要对该区域的特殊线索操作（并非查找所有的线索），可以用 DEFINE 宏定义 UDF，而不用将线索指针从 FLUENT 的求解器传递到 UDF。UDF 还可以使用 Lookup_Thread 来获得想要的指针。这一过程分两步：首先，从 FLUENT 的边界条件面板中获得区域的 ID；然后，使用硬代码作为自变量调用宏 Lookup_Thread。Lookup_Thread 返回与给定区域 ID 相关的线索指针，可以将线索指针赋给 thread_name，并在 UDF 中使用。

```
int zone_ID;
Thread *thread_name = Lookup_Thread(domain,zone_ID);
```

在多相流的上下文中，通过宏 Lookup_Thread 返回的线索是与控制区自变量相关的相等值线索。

（8）使用相的控制区指针

当有权访问与给定相等值线索控制区指针相关的 domain_id 时，可以使用 DOMAIN_ID 宏来实现。DOMAIN_ID 有一个自变量 subdomain，它是相等值线索控制区的指针。控制区（混合物）的最大等值线索 domain_id 的默认值为 1。即如果被传递给 DOMAIN_ID 的控制区指针是混合物控制区的等值线索指针，则函数的返回值为 1。注意，当在 FLUENT 的相面板中选择需要的相时，宏所返回的 domain_id 是和显示在图形用户界面中的整数值 ID 相同的。

```
Domain *subdomain;
int domain_id = DOMAIN_ID(subdomain);
```

（9）通过相控制区使用相控制区索引号

宏 PHASE_DOMAIN_INDEX 返回给定相等值线索控制区（子区）指针的 phase_domain_index。PHASE_DOMAIN_INDEX 有一个自变量 subdomain，它是 phase-level domain 的指针。phase_domain _index 是子区指针的索引号，初始相的值为整数 0，以后每相依次加 1。

```
Domain *subdomain;
int phase_domain_index = PHASE_DOMAIN_INDEX(subdomain);
```

5. 访问邻近网格和线索变量的宏

FLUENT 提供了确定邻近网格面和线索变量的宏。在复杂的 UDF 文件中，当查询特定网格或线索的面时，就会用到这个宏。对给定的面 f 和它的线索 tf，两个相邻的网格点为 c0 和 c1。若是控制区附面层上的面，则只有 c0，c1 的值为 NULL。一般来说，当把网格导入到 FLUENT 中时，按照右手定则定义面上节点的顺序，面 f 上的网格点 c0、c1 都存在。下面的宏返回网格点 c0 和 c1 的 ID 和所在的线索。

```
cell_t c0 = F_C0(f,tf);        /* returns ID for c0*/
tc0 = THREAD_T0(tf);           /* returns the cell thread for c0 */
cell_t c1 = F_C1(f,tf);        /*returns ID for c1 */
tc1 = THREAD_T1(tf);           /* returns the cell thread for c1 */
```

6. 为网格定义内存的宏

为了存储、恢复 UDF 网格区域变量的值，可以用 C_UDMI 宏来分配 500 个单元。这些值可以用作后处理。这个在用户定义内存中存储变量的方法比用户定义标量更加有效，其格式如下：

```
C_UDMI (c, thread, index)
```

c 是网格标志符号，thread 是网格线指针，index 用于识别数据内存分配。与索引号 0 相关的用户定义的内存区域为 0。在用作内存存放变量之前，首先需要在 FLUENT 的 User-Defined Memory 面板中分配内存。在图形用户窗口分配的每一个用户定义的内存，都会创建一个新的变量。例如，要指定两个内存分配区，那么两个变量 udm-0 和 udm-1 就会在数据储存器中产生。这些名字将会在后台处理面板中显示出来。

7. 矢量工具

FLUENT 提供了可以用在 UDF 中计算有关矢量的工具，它们在源程序中以宏的形式运行。下面详细介绍在 UDF 中可以利用的矢量工具。在矢量工具宏中有个约定俗成的惯例，V 代表矢量，S 代表标量，D 代表一系列三维的矢量。在矢量函数中约定的计算顺序，括号、指数、乘除、加减（PEMDAS）不再适用，相反，下划线符号（_）用来表示一组操作数，因此，对元素的操作先于形成一个矢量。

（1）NV_MAG

NV_MAG 用于计算矢量平方和的平方根。

```
NV_MAG(x)
    2D:  sqrt(x[0]*x[0] + x[1]*x[1]);
    3D:  sqrt(x[0]*x[0] + x[1]*x[1] + x[2]*x[2]);
```

（2）NV_MAG2

NV_MAG2 用于计算矢量的平方和。

```
NV_MAG2(x)
    2D:  (x[0]*x[0] + x[1]*x[1]);
    3D:  (x[0]*x[0] + x[1]*x[1] + x[2]*x[2]);
```

（3）ND_ND

在 RP_2D 和 RP_3D 中，常数 ND_ND 定义为 2。如果想在 2D 中建立一个 2×2 的矩阵，或在 3D 中建立一个 3×3 的矩阵时，可以用到它。

```
real A[ND_ND][ND_ND]
for (i=0; i<ND_ND; ++i)
  for (j=0; J<ND_ND; ++j)
    A[i][j] = f(i, j);
```

（4）ND_SUM

ND_SUM 用于计算 ND_ND 的和。

```
ND_SUM(x, y, z)
    2D:   x + y;
    3D:   x + y + z;
```

（5）ND_SET

ND_SET 用于产生 ND_ND 的任务说明。

```
ND_SET(u, v, w, C_U(c, t), C_V(c, t), C_W(c, t))
    u = C_U(c, t);
    v = C_V(c, t);
if 3D:
    w = C_W(c, t);
```

（6）NV_V

NV_V 用于完成对两个矢量的操作。

```
NV_V(a, =, x);
     a[0] = x[0]; a[1] = x[1];
```

（7）NV_VV

NV_VV 用于完成对矢量的基本操作。在下面的宏调用中，“+”还可以被符号“–”、“/”、“*”代替。

```
NV_VV(a, =, x, +, y)
    2D:   a[0] = x[0] + y[0], a[1] = x[1] + y[1];
```

（8）NV_V_VS

NV_V_VS 用于把两个矢量相加（后一项都乘以一常数）。符号“+”可以换成“–”、“*”、“/”，符号“*”可以替换成“/”。

```
NV_V_VS(a, =, x, +, y, *, 0.5);
    2D:   a[0] = x[0] + (y[0]*0.5), a[1] = x[1] +(y[1]*0.5);
```

（9）NV_VS_VS

NV_VS_VS 用于把两个矢量相加（每一项都乘以一常数）。符号“+”可以换成“–”、“*”、“/”，符号“*”可以替换成“/”。

```
NV_VS_VS(a, =, x, *, 2.0, +, y, *, 0.5);
    2D:  a[0] = (x[0]*2.0) + (y[0]*0.5), a[1] = (x[1]*2.0) + (y[1]*0.5);
```

（10）ND_DOT

下列工具可以计算两个矢量的点积。

```
ND_DOT(x, y, z, u, v, w)
    2D:  (x*u + y*v);
    3D:  (x*u + y*v + z*w);
NV_DOT(x, u)
    2D:  (x[0]*u[0] + x[1]*u[1]);
    3D:  (x[0]*u[0] + x[1]*u[1] + x[2]*u[2]);
NVD_DOT(x, u, v, w)
    2D:  (x[0]*u + x[1]*v);
    3D:  (x[0]*u + x[1]*v + x[2]*w);
```

8. 与非定常数值模拟有关的宏

用 RP 变量宏有权访问 UDF 中非定常的变量。如可以利用 RP_Get_Real 宏获得流动的时间：

```
real current_time;
current_time = RP_Get_Real("flow-time");
```

表 10-12 是在每个时间步长处理时间信息的 RP 宏列表。

表 10-12　每个时间步长处理时间信息的 RP 宏列表

RP 宏	返 回 信 息
RP_Get_Real ("flow-time")	返回当前的计算时间（秒）
RP_Get_Real ("physical-time-step")	返回当前的计算时间-步长（秒）
RP_Get_Integer ("time-step")	返回当前的计算时间-步长数（秒）

10.4.3　常用 DEFINE 宏

DEFINE 宏一般分为通用的 DEFINE 宏、模型指定的 DEFINE 宏、多相流模型中的 DEFINE 宏、离散相模型中的 DEFINE 宏及动网格模型中的 DEFINE 宏 5 类。

1. 通用的 DEFINE 宏

通用的 DEFINE 宏执行一般的访问和操作求解器数据的操作，这些函数都是和 FLUENT 中的物理模型无关的。

（1）DEFINE_ADJUST(name, d)

DEFINE_ADJUST 宏是一个调节和修改 FLUENT 变量的通用宏。在每一步迭代开始之前，利用该宏函数可以修改流场变量，对流场的某个变量进行积分，或根据流场的变量对边界条件进行调整。该宏函数包括两个哑元：symbol name 和 Domain*d。name 是所指定的 UDF 的名字，d 是一个指针，指向一个 domain 数据，由 FLUENT 求解器传递给 UDF。该宏函数没有返回值。

（2）DEFINE_INIT(name, d)

DEFINE_INIT 宏可以定义一个初始场，在初始化时被执行一次，并在求解器进行默认初始

化之后调用，结果与使用 patch 一样，常被用来在某些指定区域进行流场初始值的设置。该宏函数包括两个哑元：symbol name 和 Domain*d。name 是所指定的 UDF 的名字，d 是一个指针，指向一个 domain 数据，由 FLUENT 求解器传递给 UDF。该宏函数没有返回值。

（3）DEFINE_ON_DEMAND(name)

DEFINE_ON_DEMAND 宏可以定义一个按命令执行的 UDF，UDF 只有在接到用户指令被激活时才调用，并不和迭代过程联系在一起。该宏函数只有一个哑元：symbol name。name 是所指定的 UDF 的名字，该宏函数没有返回值。

（4）DEFINE_RW_FILE(name, fp)

DEFINE_RW_FILE 被用于定义要写入 cas 或 dat 文件的信息，可以保持或存储任何 data 类型的自定义变量。该宏函数包含两个哑元：symbol name 和 FILE*d。name 是所指定的 UDF 的名字，fp 是一个指针，指向所需写入的文件，由 FLUENT 求解器传递给 UDF。该宏函数没有返回值。

（5）DEFINE_DELTAT(name, d)

DEFINE_DELTAT 宏用于进行非定常问题求解时时间步长的控制和调整，只有在可变时间步长度选项被激活的情况下才可以调用。函数返回值就是时间步长的值。该宏函数包括两个哑元：symbol name 和 Domain*d。name 是所指定的 UDF 的名字，d 是一个指针，指向一个 domain 数据，由 FLUENT 求解器传递给 UDF。该宏函数返回值是实型。

（6）DEFINE_EXECUTE_AT_END(name)

DEFINE_EXECUTE_AT_END 宏在迭代的最后一步或最后一个时间步完成后被执行。如果想在某个特殊时刻计算流量，则可以调用这个宏函数。该宏函数只有一个哑元：symbol name。name 是所指定的 UDF 的名字，该宏函数没有返回值。

除了 DEFINE_EXECUTE_AT_END 之外，还有 DEFINE_EXECUTE_AT_EXIT、DEFINE_EXECUTE_FROM_GUI、DEFINE_EXECUTE_ON_LOADING 3 个通用宏函数，DEFINE_EXECUTE_AT_EXIT 在退出 FLUENT 任务时执行；DEFINE_EXECUTE_FROM_GUI 在所指定的某个图标或其他 GUI 控件被单击时执行；DEFINE_EXECUTE_ON_LOADING 只能用于编译型 UDF 中，在 FLUENT 加载编译完 UDF 时执行。

2. 模型指定的 DEFINE 宏

FLUENT 中的模型指定宏比较常用，表 10-13 列举了相关模型指定宏的函数名称与功能。

表 10-13　相关模型指定宏的函数名称与功能

宏函数名称	功　能
DEFINE_PROFILE	自定义边界截面上的变量分布
DEFINE_PROPERTY	自定义材料属性
DEFINE_HEAT_FLUX	用于修正壁面的热通量
DEFINE_NET_REATION_RATE	返回所有组分的质量净摩尔反应率
DEFINE_CHEM_STEP	在给定时间步上积分，获得所有组分的均相净质量反应率，可用于 EDC 和 PDF 输运模型
DEFINE_SOURCE	定义用户源项
DEFINE_CPHI	部分预混燃烧模型中的混合常数的定义

续表

宏函数名称	功　能
DEFINE_TURB_PREMIX_SOURCE	定义湍流燃烧率和源项
DEFINE_DIFFUSIVITY	用于定义组分输运方程或者用户自定义标量（UDS）方程中扩散率和扩散系数的确定
DEFINE_DOM_DIFFUSE_REFLECTIVITY	常用于修改界面上的扩散反射率和扩散传播率
DEFINE_DOM_SPECULAR_REFLECTIVITY	改变特殊反射半透明壁面的内表面的发射率
DEFINE_DOM_SOURCE	改变关于离散坐标辐射模型中辐射输运方程中的发射项和散射项等源项
DEFINE_SCAT_PHASE_FUNC	为辐射模型定义辐射分数相函数
DEFINE_SOLAR_INTENSITY	用于太阳辐射模型中定义辐射强度等参数
DEFINE_GRAY_BAND_ABS_COEFF	自定义灰带的吸收系数为温度的某个函数，用于非灰带DO 辐射模型
DEFINE_VR_RATE	自定义容积化学反应速率表达式
DEFINE_SR_RATE	定义用户表面反应率
DEFINE_NOX_RATE	用于修改各种 NO_X 的生成率
DEFINE_SOX_RATE	修改 SO_X 的生成率
DEFINE_PR_RATE	在粒子表面反应模型中自定义一个粒子表面反应
DEFINE_PRANDTL_(D，K，O，T，T_WALL)	用于湍流计算中规定各个湍流参数方程的普朗特数
DEFINE_TRUBULENT_VISCOSITY	自定义一种湍流粘性系数的函数
DEFINE_WALL_FUNCTIONS	自定义壁面函数

3. 多相流模型中的 DEFINE 宏

多相流模型中的 DEFINE 宏只能用于多相流模型中，主要包括的宏函数如表 10-14 所示。

表 10-14　多相流模型中的 DEFINE 宏

宏函数名称	功　能
DEFINE_CAVITATION_RATE	对一个多相混合模型流动建立由于压力和张力而导致产生水蒸气的模型
DEFINE_EXCHANGE_PROPERTY	规定关于多相模型中相间相互作用变量的 UDFs
DEFINE_HET_RXN_RATE	指定多相反应速率
DEFINE_MASS_TRANSFER	指定多相流动问题中的质量传输速率
DEFINE_VECTOR_EXCHANGE_PROPERTY	定义相间速度滑移

4. 离散相模型中的 DEFINE 宏

离散相模型中的相关 DEFINE 宏函数及功能如表 10-15 所示。

表 10-15　离散相模型中的相关 DEFINE 宏

宏函数名称	功　能
DEFINE_DPM_BC	自定义粒子到达边界后的状态
DEFINE_DPM_BODY_FORCE	定义除粒子重力或阻力外的其他体积力

续表

宏函数名称	功　能
DEFINE_DPM_DRAG	自定义颗粒和流体之间的阻力系数
DEFINE_DPM_EROSION	定义颗粒撞击壁表面后的腐蚀和增长率
DEFINE_DPM_HEAT_MASS	自定义颗粒和连续相流体的传热和传质
DEFINE_DPM_INJECTION_INIT	自定义颗粒入射到流场中的初始条件
DEFINE_DPM_LAW	自定义粒子的定律
DEFINE_DPM_OUTPUT	修改写入取样输出的内容
DEFINE_DPM_PROPERTY	自定义离散相粒子的材料属性
DEFINE_DPM_SCALAR_UPDATE	在每次颗粒位置更新后更新标量的值
DEFINE_DPM_SOURCE	自定义粒子运动方程中的源项
DEFINE_DPM_SPRAY_COLLODE	自定义喷雾模型中液滴间的碰撞算法
DEFINE_DPM_SWITCH	修改粒子定律之间的转换标准
DEFINE_DPM_TIMESTEP	自定义颗粒轨道模型中的时间步长
DEFINE_DPM_VP_EQUILIB	指定平衡蒸汽压力

5. 动网格模型中的 DEFINE 宏

动网格模型中的相关 DEFINE 宏函数及功能如表 10-16 所示。

表 10-16　动网格模型中的相关 DEFINE 宏

宏函数名称	功　能
DEFINE_GC_MOTION	定义重心移动
DEFINE_GEOM	定义变形的几何区域，重新配置节点
DEFINE_GRID_MOTION	独立控制每个节点的运动
DEFINE_SDOF_PROPERTIES	定义移动物体的六自由度运动规律

10.5　UDF 解释与编译

UDF 编写好之后需要通过解释或编译将其加载到 FLUENT 中。解释和编译的英文分别为 interpret 和 compile，下面分别进行介绍。

10.5.1　UDF 的解释

UDF 解释是最简单的加载方法，优点是不需要安装 C 编译器，适合简单的 UDF 程序。

UDF 解释的过程很简单，首先将编写好的 UDF 文件放至工作目录下，然后在 FLUENT 的主菜单中选择 Define→User-Defined→Functions→Interpreted 命令，弹出如图 10-19 所示的 Interpreted UDFs 对话框，在 Source File Name 文本输入框中输入编写好的 UDF 文件名（后缀名为.c），或利用 Browse 按钮查找 UDF 文件，单击 Interpret 按钮，即开始 UDF 的解释。若选中 Display Assembly Listing 复选框，视图窗口中还会显示解释信息列表。如果程序有错误，

FLUENT 会提示错误的原因及发生错误的程序行数。



图 10-19　Interpreted UDFs 对话框

解释成功后，UDF 就已经加载到了工程中，用户可根据需要在边界条件、材料属性或其他对话框中调用。

10.5.2　UDF 的编译

由于有些 UDF 函数不支持解释运行，所以需要对其进行编译。编译的前提是必须正确安装 C/C++编译器。

正确安装 C/C++编译器之后，在 FLUENT 主菜单中选择 Define→User-Defined→Functions→Compiled 命令，弹出如图 10-20 所示的 Compiled UDFs 对话框。对话框左侧的 Source Files 列表框用于增加和显示 UDF 程序，右侧的 Header Files 列表框用于增加和显示需要的头文件。单击左侧 Source Files 列表框下的 Add 按钮，在弹出的 Select File 对话框中查找需要加载的 UDF 文件，单击 OK 按钮关闭 Select File 对话框。

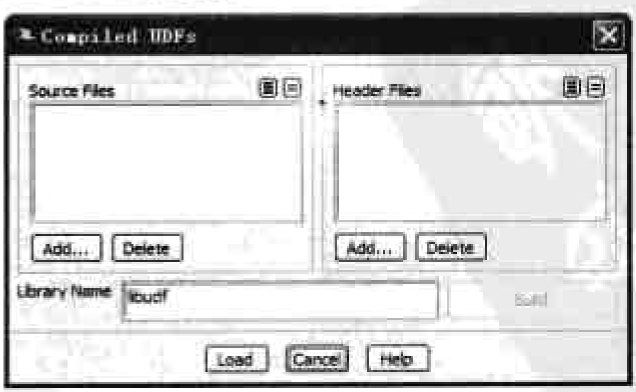


图 10-20　Compiled UDFs 对话框

回到 Compiled UDFs 对话框中，即可发现 Source Files 列表框中已经出现了加载进来的 UDF 文件，此时需要用户在 Library Name 文本输入框中输入共享库的名字，并单击 Library Name 文本输入框右侧的 Build 按钮，建立一个共享库，同时编译 UDF 文件，并把编译好的 UDF 文件放入该共享库中。若编译正确，则可单击 Load 按钮把编译好的 UDF 文件装载到当前工程中应用。

10.6 实例·操作——液体蒸发

蒸汽炉、沸腾炉及部分热交换器中存在着剧烈的流体相变现象，液态水在高温下蒸发会变成气态并从液面逸出，蒸汽与冷流体发生热交换后液化放热会变成水滴沉降，如图 10-21 所示。容器内流体的相变程度往往决定了该装置的工作效率及换热效率，如何提高流体的相变程度已成为相关容器设计者关注的首要问题。

本例针对一个简化二维容器内部水的蒸发相变过程进行模拟分析，容器尺寸如图 10-22 所示，容器底部被持续地加热，可看作存在一个恒定的温度。容器内装满水，液面为自由液面（1atm），与底部接触的水蒸发形成水蒸气气泡，并逐渐上窜至液面逸出，属于动态变化过程。

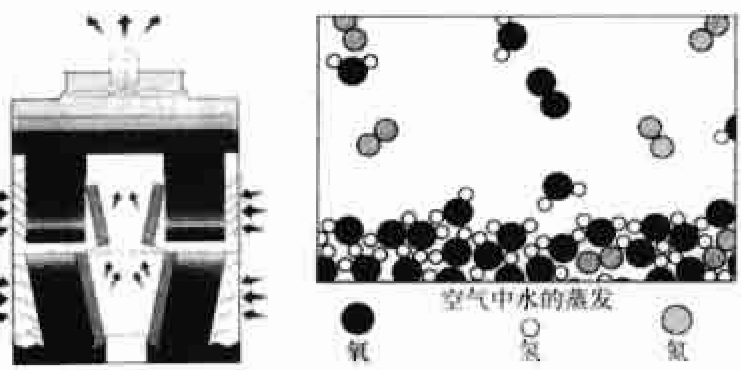


图 10-21　液体蒸发



图 10-22　计算区域尺寸

【思路分析】

本例模拟水蒸发相变生成气的过程，需要定义水与水蒸气之间转换的 UDF 函数，通过编译导入 FLUENT 中。另外，水蒸发过程和水蒸气在水中上窜过程都属于非定常问题，故需要采用非定常模型。具体的操作流程如图 10-23 所示。

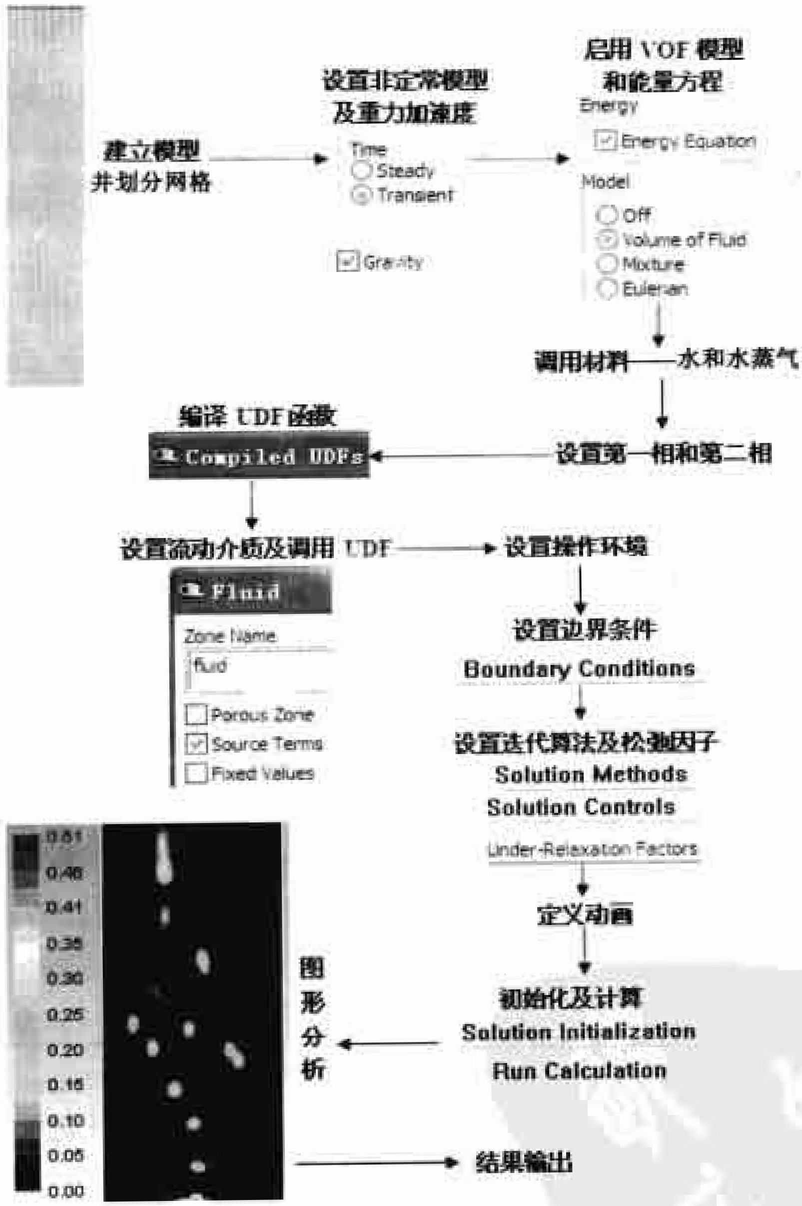


图 10-23　液体蒸发模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch10\10-6.msh，source.c 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch10\10-6.cas，10-6-1s.cas，10-6-1s.dat，10-6-2s.cas，10-6-2s.dat，10-6-3s.cas，10-6-3s.dat，10-6.gif 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch10\10-6.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 二维解算器。

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中找到 10-6.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，导入后的网格如图 10-24 所示。

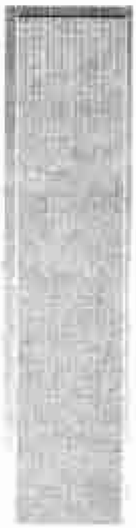


图 10-24 计算网格

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在展开的面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，如图 10-25 所示，对话框中显示了模型的尺寸范围，这里无须改动，单击 Close 按钮，关闭对话框。



图 10-25 Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）在 Solver 栏中选择 Time 为 Transient，并选中 Gravity 复选框，设置 Y(m/s2)为-9.8，如图 10-26 所示。

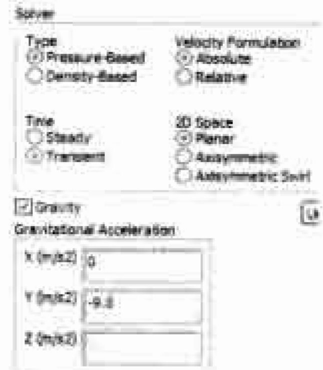


图 10-26 基本模型设置

（6）选择操作面板中 Problem Setup 下的 Models 选项，双击 Energy-Off 选项，弹出如图 10-27 所示的 Energy 对话框，选中 Energy Equation 复选框，单击 OK 按钮。回到 Models 面板，双击 Multiphase Model-Off 选项，弹出如图 10-28 所示的对话框，选中 Volume of Fluid 单选按钮，单击 OK 按钮。



图 10-27 Energy 对话框

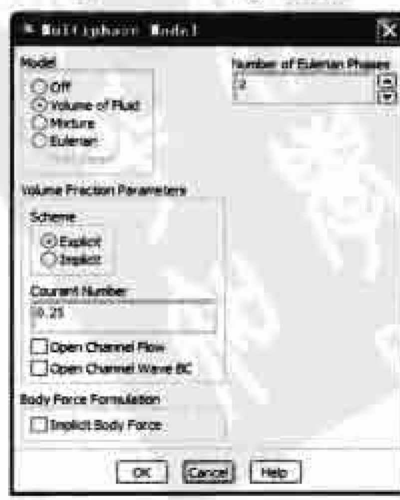


图 10-28 Multiphase Model 对话框

（7）选择 Problem Setup 下的 Materials 选项，单击 Materials 面板中的 Create/Edit 按钮，弹出 Create/Edit Materials 对话框。在对话框中单击 FLUENT Database 按钮，弹出如图 10-29 所示的 FLUENT Database Materials 对话框，保持介质类型为 fluid，选择左侧列表框中的 water-liquid(h2o<l>)和 water-vapor(h2o) 选项，单击 Copy 按钮。回到 Create/Edit Materials 对话框，单击 Close 按钮。



图 10-29　FLUENT Database Materials 对话框

（8）选择 Problem Setup 下的 Phases 选项，双击 Phases 面板中的 Phase-Primary Phase 选项，弹出如图 10-30 所示的 Primary Phase 对话框，选择 Phase Material（第一相材料）为 water-liquid，单击 OK 按钮。回到 Phases 面板，双击 Phase-Secondary Phase 选项，弹出如图 10-31 所示的 Secondary Phase 对话框，选择 Phase Material（第二相材料）为 water-vapor，单击 OK 按钮。



图 10-30　第一相设置



图 10-31　第二相设置

（9）选择 Define→User-Defined→Functions→Compiled 命令，弹出如图 10-32 所示的 Compiled UDFs 对话框，单击 Source Files 栏中的 Add 按钮，找到 source.c 文件并导入。然后单击 Build 按钮，此时弹出如图 10-33 所示的警告对话框，单击 OK 按钮。待文本界面中出现 Done 语句，如图 10-34 所示，单击 Load 按钮调入 UDF，最后关闭该对话框。



图 10-32　Compiled UDFs 对话框



图 10-33　警告对话框

```
(chdir "ntx86\2d")()
# Generating ud_io1.h
source.c
# Generating udf_names.c becau
udf_names.c
# Linking libudf.dll because o
Microsoft (R) Incremental Link
Copyright (C) Microsoft Corp 1
   Creating library libudf.lib
Done.
```

图 10-34　编译信息

（10）选择 Problem Setup 下的 Cell Zone Conditions 选项，在展开的面板中保持 Phase 下拉列表框中选中 mixture 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 10-35 所示的 Fluid 对话框。选中 Source Terms 复选框，并选择 Source Terms

选项卡，单击 Energy(W/m3)右侧的 Edit 按钮，弹出如图 10-36 所示的 Energy(W/m3) sources 对话框，在其中的下拉列表框中选择 udf enrg_src::libudf 选项，单击 OK 按钮。回到 Fluid 对话框，再次单击 OK 按钮。接着在 Cell Zone Conditions 面板的 Phase 下拉列表框中选择 phase-1 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 10-37 所示的对话框，选中 Source Terms 复选框，并选择 Source Terms 选项卡，单击 Mass(kg/m3-s) 右侧的 Edit 按钮，弹出 Mass(kg/m3-s) sources 对话框，在其中的下拉列表框中选择 udf liq_src::libudf 选项，如图 10-38 所示，单击 OK 按钮。按照同样的方式设置第二相的介质源项为 vap_src::libudf。

（11）单击 Cell Zone Conditions 面板右下角的 Operating Conditions 按钮，弹出操作环境设置对话框，选中 Variable-Density Parameters 栏中的 Specified Operating Density 复选框，并设置其操作密度为 0.5542，其余设置如图 10-39 所示，单击 OK 按钮。

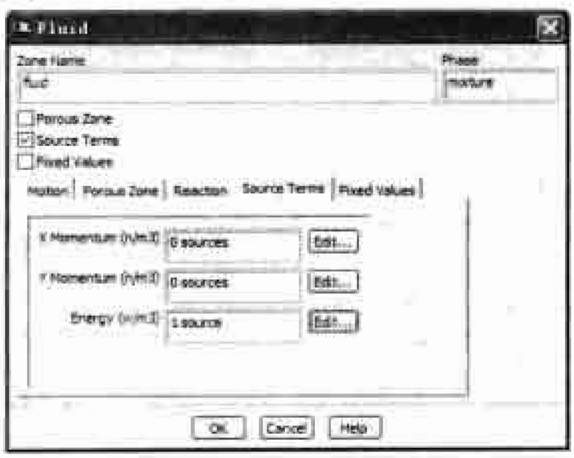


图 10-35　Fluid 对话框

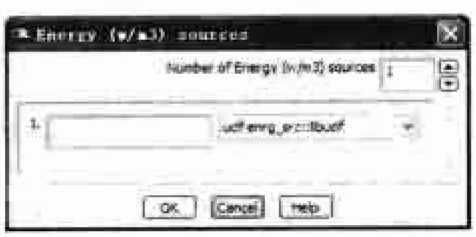


图 10-36　Energy(W/m3) sources 对话框



图 10-37　液相源项设置



图 10-38　液相 UDF 设置



图 10-39　Operating Conditions 对话框

（12）选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，在打开的面板中选择 wall-hot 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 10-40 所示的 Wall 对话框，选择 Thermal 选项卡，设置热边界为定温边界，并设置 Temperature(k)为 573，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，选择 wall-1 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 10-41 所示的 Wall 对话框，选择 Thermal 选项卡，并选择其热边界形式为 Heat Flux，设置 Heat Flux(W/m2)为 0，即为绝热边界，单击 OK 按钮。按照同样的方式设置 wall-2

也为绝热边界。最后在 Boundary Conditions 面板中选择 poutlet 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 10-42 所示的 Pressure Outlet 对话框，保持总压为 0，选择 Thermal 选项卡，输入温度 372，如图 10-43 所示，单击 OK 按钮。

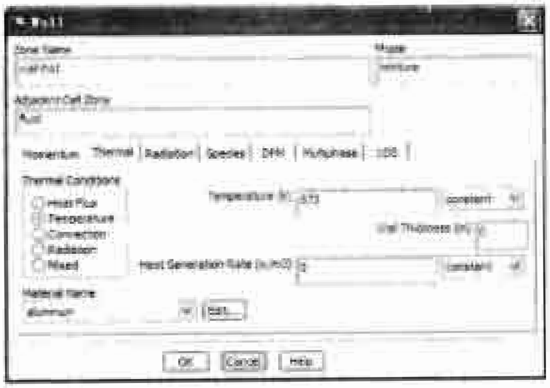


图 10-40　底部热壁设置

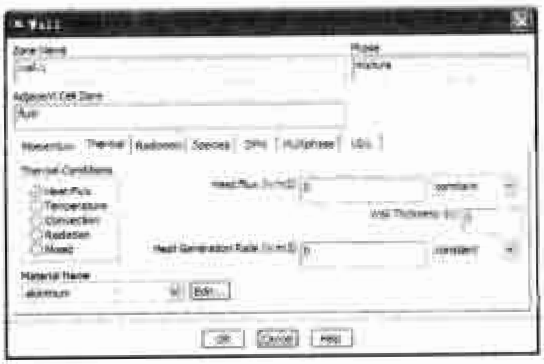


图 10-41　容器侧壁设置

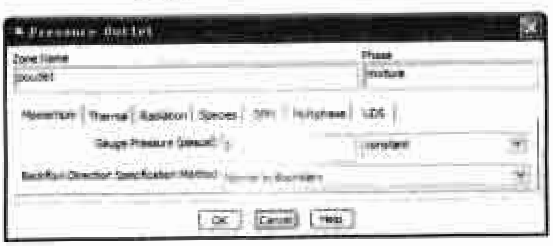


图 10-42　压力出口边界设置

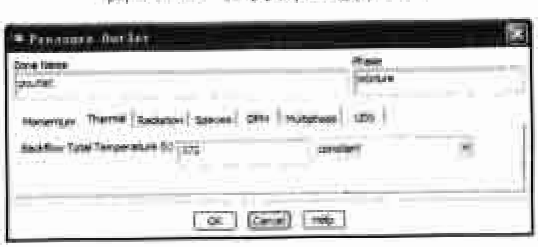


图 10-43　出口温度设置

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，保持默认的算法设置。选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，设置 Pressure 和 Momentum 的松弛因子分别为 0.2 和 0.5，其余保持默认，如图 10-44 所示。

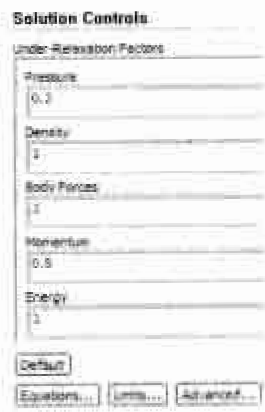


图 10-44　松弛因子设置

（14）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在展开的面板中选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 10-45 所示的对话框，设置 energy 的精度为 1e-06、continuity 和 x-velocity 的收敛精度为 1e-05、y-velocity 的收敛精度为 0.0001，单击 OK 按钮。

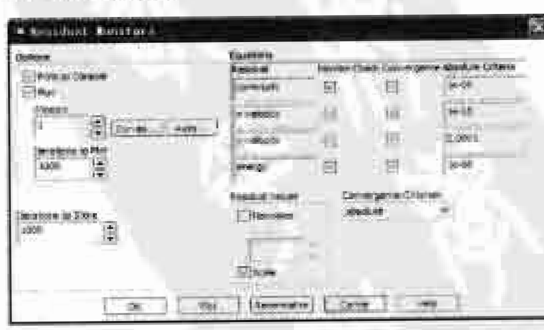


图 10-45　收敛精度设置

（15）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Initialization 选项，选择展开面板中的 Compute from 为 all-zones，设置温度为 372K，单击 Initialize 按钮，完成计算初始化，如

图 10-46 所示。



图 10-46　初始化

（16）选择操作面板中 Solution 下的 Calculation Activities 选项，单击面板最下方 Solution Animations 选项卡中的 Create/Edit 按钮，弹出如图 10-47 所示的 Solution Animation 对话框。利用上下箭头设置 Animation Sequences 为 1，并在第一行的 Name 列输入“phase”、Every 列中输入“5”、When 列选择 Time Step，然后单击 Define 按钮，弹出如图 10-48 所示的 Animation Sequence 对话框，设置 Window 为 2，选择 Display Type 为 Contours，此时如图 10-49 所示的 Contours 对话框自动弹出，在 Contours of 栏中的下拉列表框中选择 Phases... 和 Volume fraction 选项，并选择 Phase 为 phase-2，单击 Display 按钮，视图窗口中呈现初始时刻的气相分布云图，单击 Close 按钮。连续单击两次 OK 按钮退出动画定义。

（17）初始化完后，选择 File→Write→Case 命令，保存工程文件（10-6.cas）。然后选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 10-50 所示的面板中设置 Number of Time Steps 为 100，设置 Time Step Size (s)为 0.01、Time Stepping Method 为 Fixed，并设置 Max Iterations/Time Step 为 20，单击 Calculate 按钮开始计算。

（18）第一个 100 步计算完后刚好为 1s，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（10-6-1s.cas 和 10-6-1s.dat）。然后，再迭代两次 100 步，分别保存工程与数据结果文件（10-6-2s.cas 和 10-6-2s.dat）与（10-6-3s.cas 和 10-6-3s.dat）。

（19）计算 3s 后的残差曲线，如图 10-51 所示。

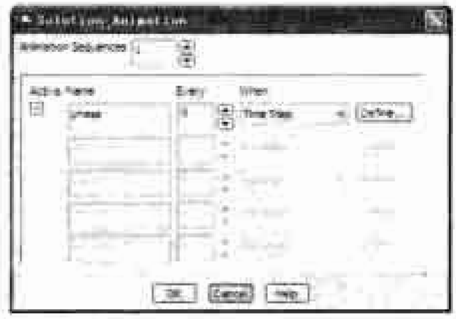


图 10-47　Solution Animation 对话框

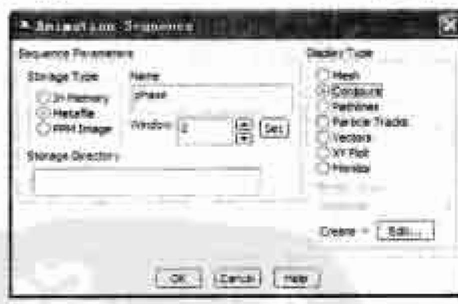


图 10-48　Animation Sequence 对话框

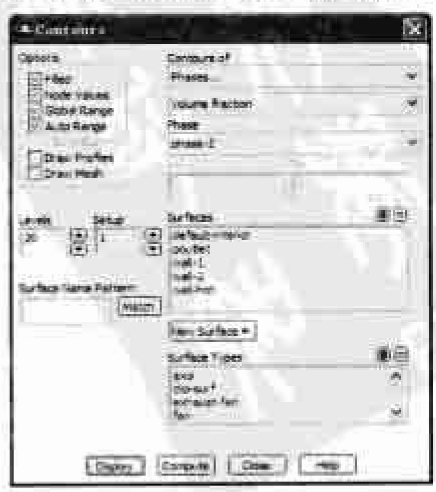


图 10-49　Contours 对话框

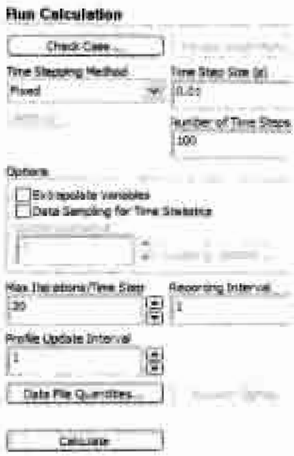


图 10-50 迭代次数设置

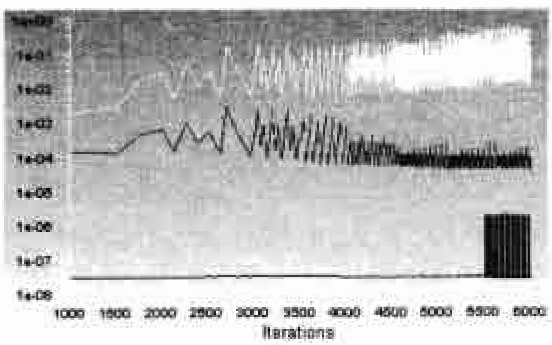


图 10-51 残差曲线

（20）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的 Graphics and Animations 面板中双击 Animations 栏中的 Solution Animation Playback 选项，弹出 Playback 对话框，选择动画输出为 Picture Files 格式，并设置图片为彩色，单击 Write 按钮，将每帧动画以图片形式存放在当前工作目录下。然后利用 Adobe Image Ready 的动画制作功能，将所有帧的图片串接成 gif 格式的动画文件，见结果文件 10-6.gif。

（21）双击 Graphics and Animations 面板中的 Contours 选项，弹出如图 10-52 所示的 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Velocity…和 Velocity Magnitude 选项，并设置 Phase 为 mixture，单击 Display 按钮，即可看到如图 10-53 所示的混合相速度云图。若改变 Contours of 栏中的选项为 Density…和 Density，单击 Display 按钮，可得到如图 10-54 所示的混合相密度云图。改变 Contours of 中的选项为 Phases…和 Volume fraction，并选择 Phase 为 phase-2，单击 Display 按钮，视图窗口中呈现出此时的气相体积分数分布云图，如图 10-55 所示。

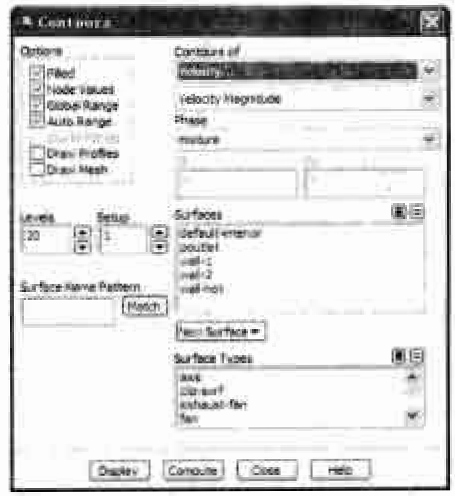


图 10-52 Contours 对话框



图 10-53 混合相速度云图



图 10-54 混合相密度云图



图 10-55　水蒸气体积分数分布云图

（22）双击 Plots 面板中的 XY Plot 选项，弹出如图 10-56 所示的对话框，选中 Options 栏中的 Position on Y Axis 复选框，设置 Plot Direction 中 Y 为 1，在 X Axis Function 下拉列表框中选择 Phase...和 Volume fraction 选项，在 Phase 下拉列表框中选择 phase-2 选项，并在 Surface 列表框中选择 default-interior 选项，单击 Plot 按钮，得到如图 10-57 所示的水蒸气沿垂向的体积分数分布。

（23）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。



图 10-56　Solution XY Plot 对话框

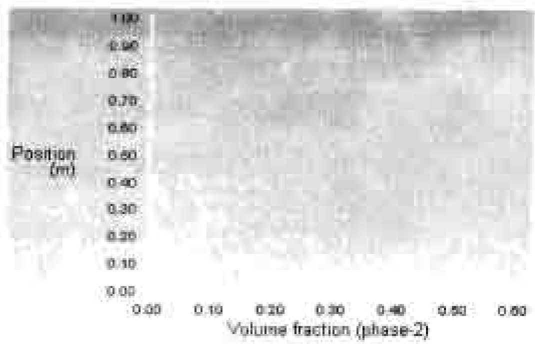


图 10-57　水蒸气体积分数沿垂向的体积分数分布

10.7　实例・练习——物体受冲运动

船舶在河流中被河水冲击而运移，这种冲击有时是不利的，尤其是在逆流航行过程中，如图 10-58 所示。在湍急的水流中，一旦有物体掉入，即可能瞬间被冲走，使得失主无法寻觅。若是人员掉入，后果则不堪设想。

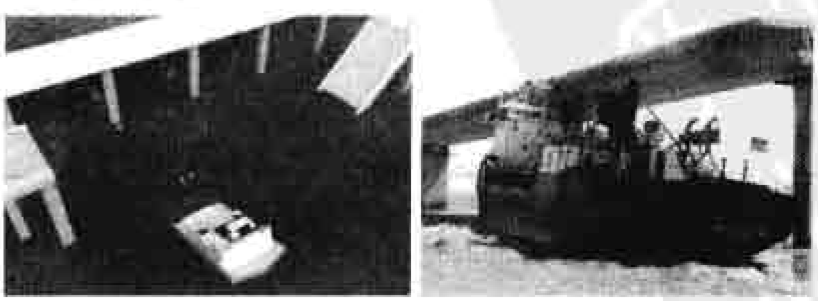


图 10-58　物体受冲

本例即对一个简化的二维隧道中的物体受冲运动进行模拟（入口气流 1m/s），旨在得到其受冲后的运移过程，具体的计算区域尺寸如图 10-59 所示。

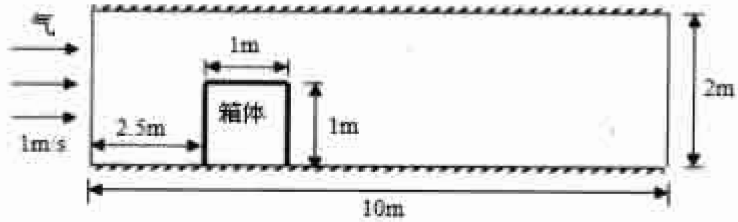


图 10-59　物体受冲计算区域尺寸

【思路分析】

作用在物体上的气流压力是推动其运动的主要作用力，在气流压力的作用下物体向右做加速运动，加速度的大小由气流压力决定，而气流压力沿流程又是逐渐改变的，因此本例需要使用 UDF 程序来更新不同位置物体的运动速度。由于本例物体是在不断运动的，因此还需要运用动网格模型。具体的操作流程如图 10-60 所示。

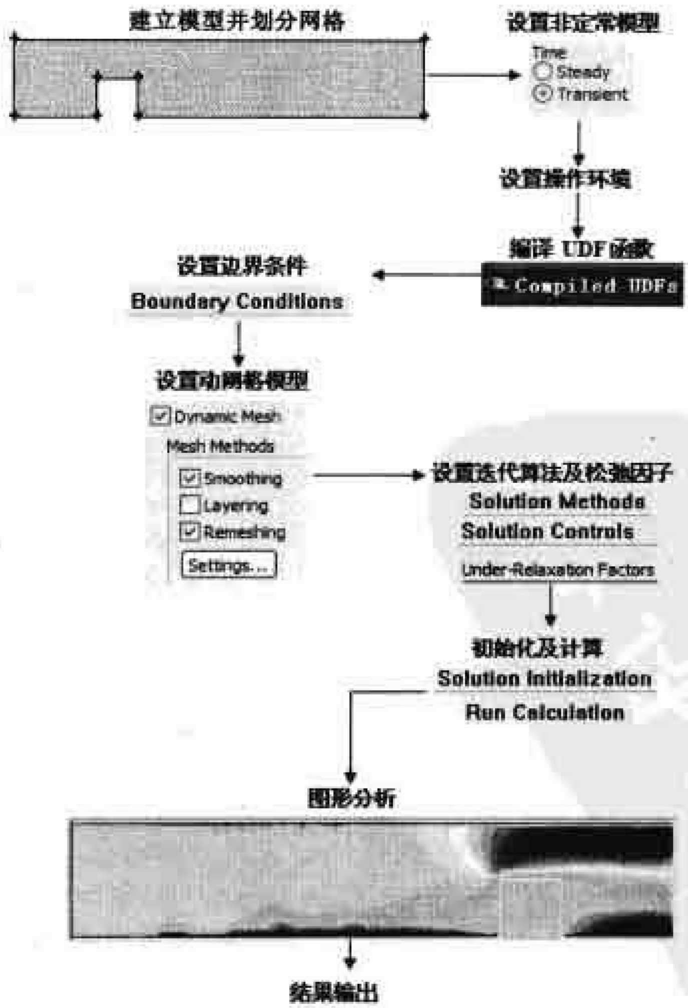


图 10-60　物体受冲运动模拟流程图

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 START\Ch10\10-7.msh，d.c 文件。

结果文件——参见附带光盘中的 END\Ch10\10-7.cas，10-7-5s.cas，10-7-5s.dat，10-7-10s.cas，10-7-10s.dat，10-7-15s.cas，10-7-15s.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch10\10-7.avi 文件。

【操作步骤】

（1）启动 FLUENT 二维解算器。

（2）选择 File→Read→Mesh 命令，在弹出的 Select File 对话框中找到 10-7.msh 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中，导入后的网格如图 10-61 所示。

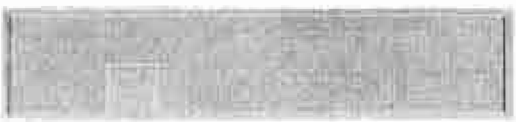


图 10-61　计算网格

（3）选择操作面板中 Problem Setup 下的 General 选项，在打开的面板中单击 Scale 按钮，弹出 Scale Mesh 对话框，如图 10-62 所示，对话框中显示了模型的尺寸范围，这里无须改动，单击 Close 按钮，关闭对话框。

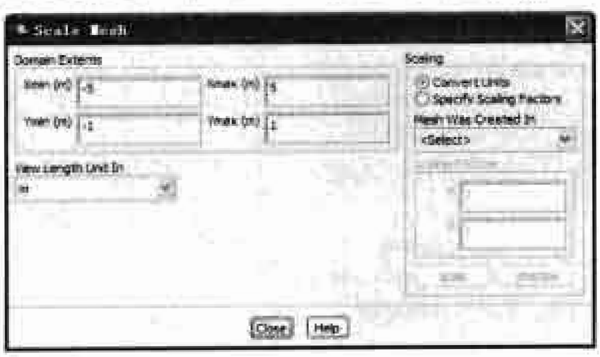


图 10-62　Scale Mesh 对话框

（4）单击 General 面板中 Mesh 栏中的 Check 按钮，检查网格，待文本界面中出现 Done，表示模型网格合适。

（5）在 Solver 栏中选择 Time 为 Transient，其余保持默认。

（6）单击 Cell Zone Conditions 面板右下角的 Operating Conditions 按钮，弹出操作环境设置对话框，保持默认设置，单击 OK 按钮。

（7）选择 Define→User-Defined→Functions→Compiled 命令，弹出 Compiled UDFs 对话框，单击 Source Files 栏中的 Add 按钮，找到 d.c 文件并导入，如图 10-63 所示。然后设置 Library Name 为 libudf1，单击其右侧的 Build 按钮，此时弹出如图 10-64 所示的警告对话框，单击 OK 按钮。待文本界面中出现 Done 语句，单击 Load 按钮调入 UDF，最后关闭该对话框。

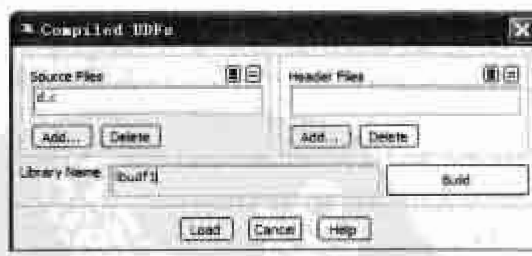


图 10-63　Compiled UDFs 对话框

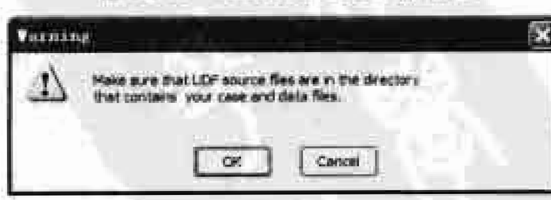


图 10-64　警告对话框

（8）选择 Problem Setup 下的 Boundary Conditions 选项，在展开的面板中选择 in 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 10-65 所示的 Velocity Inlet 对话框，速度方向为 Components，并设置 X-Velocity(m/s)为 1，单

击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 面板，选择 out 选项，单击 Edit 按钮，弹出如图 10-66 所示 Outflow 对话框，保持 Flow Rate Weighting 为 1，单击 OK 按钮。

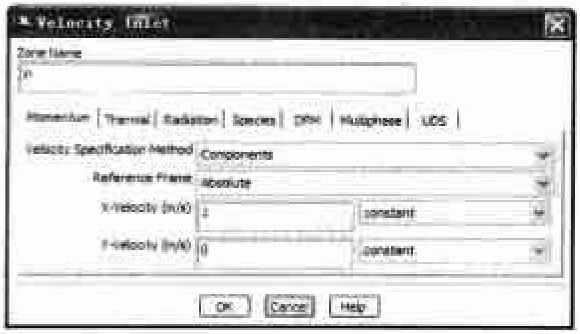


图 10-65　速度入口设置



图 10-66　出口边界设置

（9）定义本例的动网格模型。选择 Problem Setup 下的 Dynamic Mesh 选项，弹出如图 10-67 所示的 Dynamic Mesh 面板，选中 Dynamic Mesh 复选框，并在 Mesh Methods 栏中选中 Smoothing 和 Remeshing 复选框。



图 10-67　Dynamic Mesh 面板

（10）在 Dynamic Mesh 面板中单击 Mesh Methods 栏中的 Settings 按钮，弹出 Mesh Method Settings 对话框，设置 Smoothing 和 Remeshing 参数，如图 10-68 和图 10-69 所示。

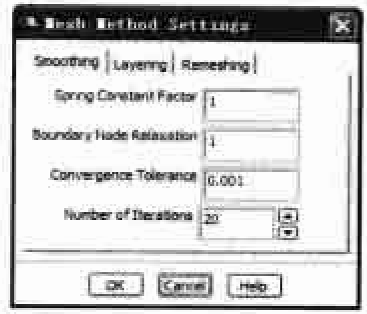


图 10-68　Smoothing 参数定义

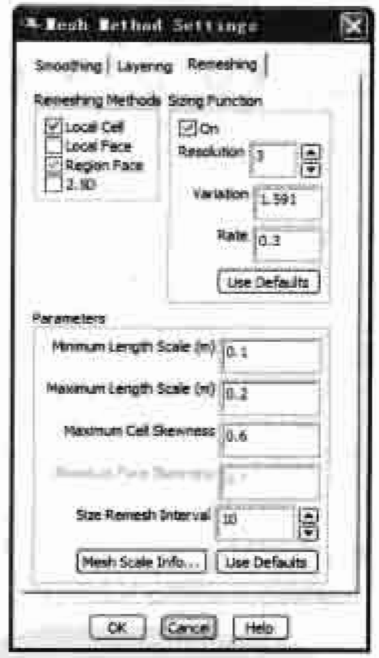


图 10-69　Remeshing 参数设置

（11）回到 Dynamic Mesh 面板，单击 Dynamic Mesh Zones 栏中的 Create/Edit 按钮，弹出如图 10-70 所示的 Dynamic Mesh Zones 对话框。选择 Zone Names 下拉列表框中的 x_bian 选项，设置其 Type 为 Rigid Body，并在下方的 Motion Attributes 选项卡中设置 Motion UDF/Profile 为 moving_body:: libudf1。然后选择 Meshing Options 选项卡，设置邻接区域的网格尺寸均为 0.1m，单击 Create 按钮。接着选择 Zone Names 下拉列表框中的 wall 选项，设置其 Type 为 Deforming，选择 Meshing Options 选项卡，进行如图 10-71 所示的设置，单击 Create 按钮。

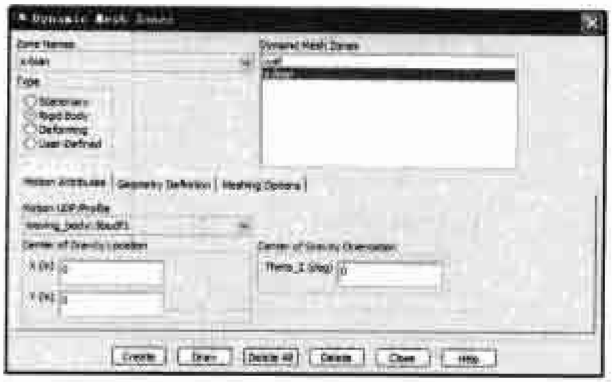


图 10-70　物体运动定义

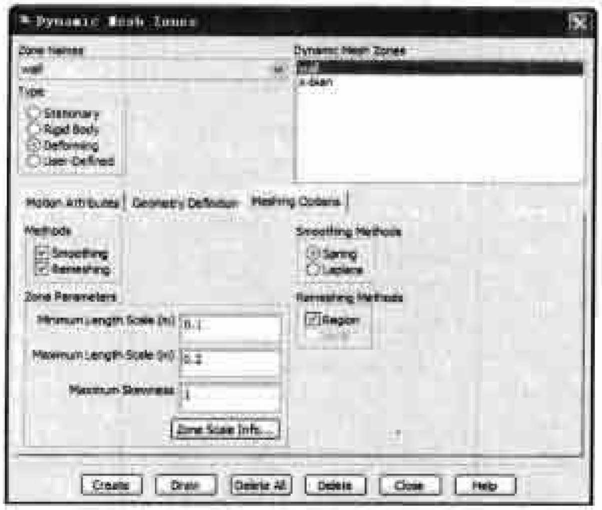


图 10-71　对称轴变形定义

（12）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Methods 选项，展开 Solution Methods 面板，保持默认的算法设置。选择操作面板中 Solution 下的 Solution Controls 选项，展开 Solution Controls 面板，保持默认的松弛因子。

（13）选择操作面板中 Solution 下的 Monitors 选项，在展开的面板中选择 Residuals-Print,Plot 选项，单击 Edit 按钮，弹出 Residual Monitors 对话框，保持默认的收敛精度设置，单击 OK 按钮。

（14）选择操作面板中 Solution 下的 Solution Initialization 选项，选择展开面板中的 Compute from 为 in，单击 Initialize 按钮，完成计算初始化，如图 10-72 所示。

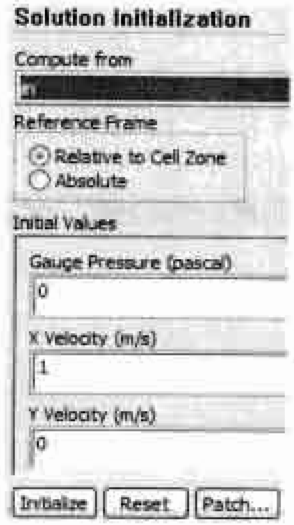


图 10-72　初始化

（15）初始化完后，选择 File→Write→Case 命令，保存工程文件（10-7.cas）。然后选择操作面板中 Solution 下的 Run Calculation 选项，在如图 10-73 所示的面板中设置 Number of Time Steps 为 100，设置 Time Step Size(s)为 0.05、Time Stepping Method 为 Fixed，并设置 Max Iterations/Time Step 为 20，单击 Calculate 按钮开始计算。

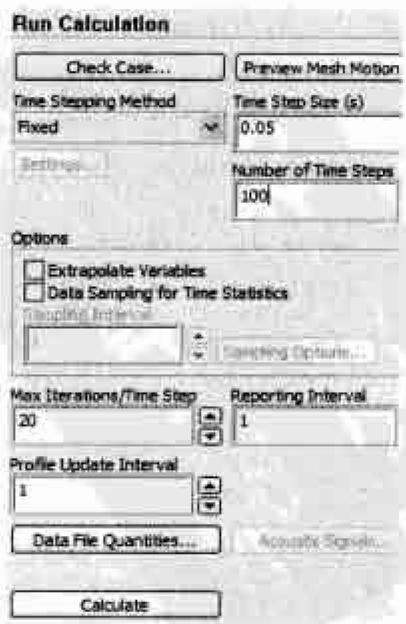


图 10-73　迭代次数设置

（16）第一个 100 步计算完后为 5s，选择 File→Write→Case & Data 命令，保存工程与数据结果文件（10-7-5s.cas 和 10-7-5s.dat）。然后再迭代两次 100 步，分别保存工程与数据结果文件（10-7-10s.cas 和 10-7-10s.dat）与（10-7-15s.cas 和 10-7-15s.dat）。

（17）计算 15s 后的残差曲线如图 10-74 所示。

（18）双击 Graphics and Animations 面板中的 Contours 选项，弹出 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Velocity... 和 Velocity Magnitude 选项，单击 Display 按钮，可得到如图 10-75 所示的速度云图。若改变 Contours of 栏中的选项为 Pressure...和 Static Pressure，单击 Display 按钮，可得到如图 10-76 所示的压强云图。

（19）最后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

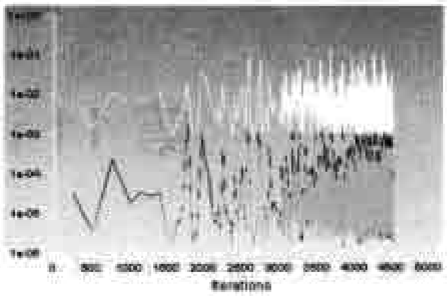


图 10-74 残差曲线

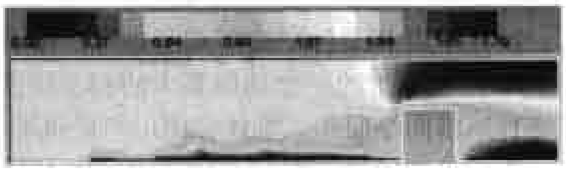


图 10-75 速度云图

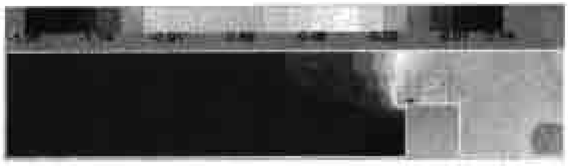


图 10-76 压强云图

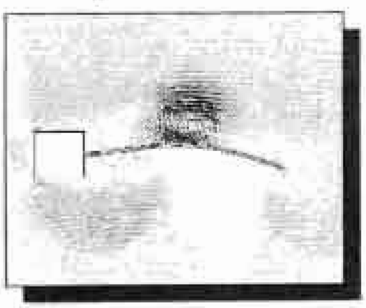
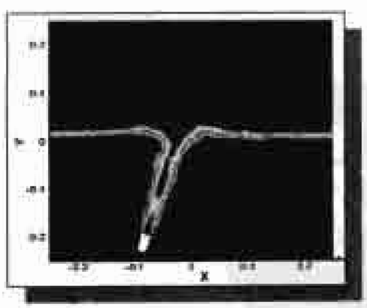
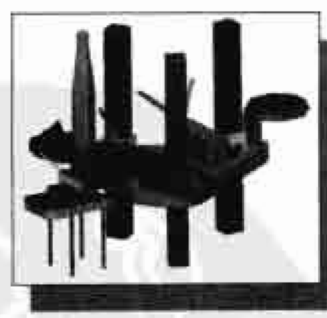
第 11 讲 图形后处理

将模拟结果以形象的图形或曲线呈现是模拟工作的最后一步——后处理。FLUENT 自身具备强大的后处理功能及图形可视化技术，能够显示各物理参数的云图、等值线图、速度矢量图和流动轨迹图等，同时还能求得力、力矩及对应的力矩系数、流量等，并生成简要的计算报告。除了应用 FLUENT 进行后处理外，读者还可以借助 Tecplot 软件进行流动后处理分析，它是 Amtec 公司推出的一个功能强大的科学绘图软件，不仅可以绘制二维图形、函数曲线，而且可以进行三维面绘图和三维体绘图，并提供了多种图形格式，且界面友好、易学易用。

本讲分别介绍利用 FLUENT 及 Tecplot 进行模拟结果后处理的操作过程，并通过 3 个实例的讲解帮助读者熟悉两个软件的后处理功能。

本讲内容

- 实例・模仿——90° 弯管水流的 FLUENT 后处理
- FLUENT 12 后处理
- Tecplot 后处理
- 实例・操作——单圆柱绕流的 Tecplot 后处理
- 实例・练习——混合器内部流动的 Tecplot 后处理

11.1 实例・模仿——90° 弯管水流的 FLUENT 后处理

在系统介绍 FLUENT 和 Tecplot 后处理操作之前，本例首先介绍利用 FLUENT 自身的后处理功能对第 3 讲中的 3D 弯管流动问题进行后处理分析，使读者对图形后处理形成初步认识。

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 END\Ch3\3-1.cas，3-1.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch11\11-1.avi 文件。

【操作步骤】

（1）双击桌面上的 FLUENT 快捷方式图标，在弹出的 FLUENT Launcher 中选择 Dimension 为 3D，如图 11-1 所示，单击 OK 按钮，打开 FLUENT 12。

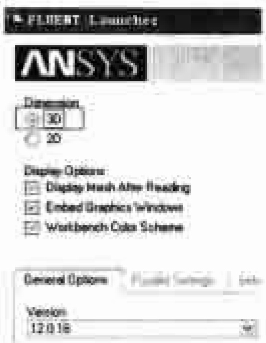


图 11-1　启动 3D 解算器

（2）选择 File→Read→Case & Date 命令，在弹出的 Select File 对话框中找到 3-1.cas 文件，并将其导入至 FLUENT 12 中。

（3）选择 Surface→Plane 命令，弹出如图 11-2 所示的 Plane Surface 对话框，在 Points 栏中输入 3 点坐标（x0：0，y0：0，z0：0，x1：1，y1：-1，z1：0，x2：0，y2：0，z2：1），并定义 New Surface Name 为 x-y，单击 Create 按钮生成弯管的一个剖面。按照同样的方式生成面 x=-2.5、x=0、y=0 和 y=2.5，对应的 3 点坐标分别为（x0：-2.5，y0：0，z0：0，x1：-2.5，y1：1，z1：0，x2：-2.5，y2：0，z2：1），（x0：0，y0：0，z0：0，x1：0，y1：1，z1：0，x2：0，y2：0，z2：1），（x0：0，y0：0，z0：0，x1：1，y1：0，z1：0，x2：0，y2：0，z2：1）和（x0：0，y0：2.5，z0：0，x1：1，y1：2.5，z1：0，x2：0，y2：2.5，z2：1）。

（4）选择操作面板中 Results 下的 Graphics and Animations 选项，在展开的 Graphics and Animations 面板中双击 Contours 选项，弹出如图 11-3 所示的 Contours 对话框，选中 Options 栏中的 Filled 复选框，在 Contours of 栏中选择 Pressure…和 Static Pressure 选项，并选择 Surfaces 列表框中的 x-y、x=-2.5、x=0、y=0 和 y=2.5，单击 Display 按钮，即可看到如图 11-4 所示的压强云图。

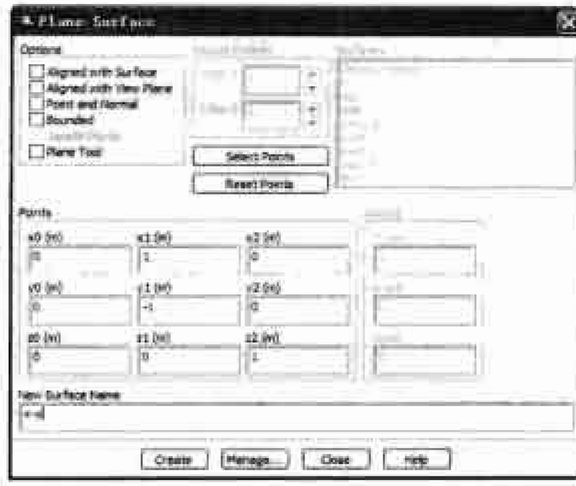


图 11-2　Plane Surface 对话框

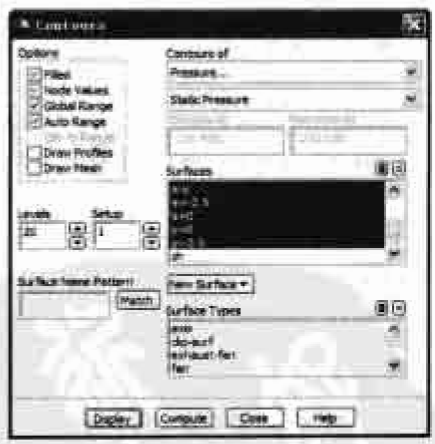


图 11-3　Contours 对话框

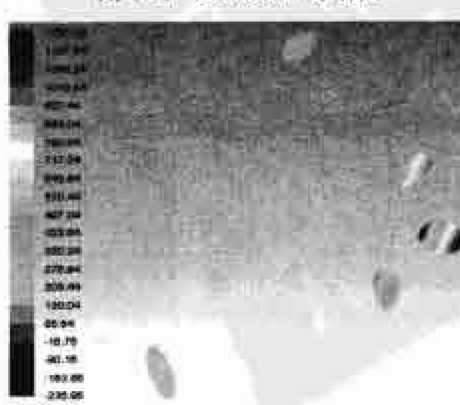


图 11-4　第一次 5 个剖面的压强云图

（5）此时，在 Contours 对话框中选中 Draw Mesh 复选框，自动弹出如图 11-5 所示的 Mesh Display 对话框。选中对话框中 Options 栏中的 Faces 复选框，并选择 Surfaces 列表框中的 in、out 和 wall 选项，单击 Display 按钮，得到如图 11-6 所示的轮廓面。

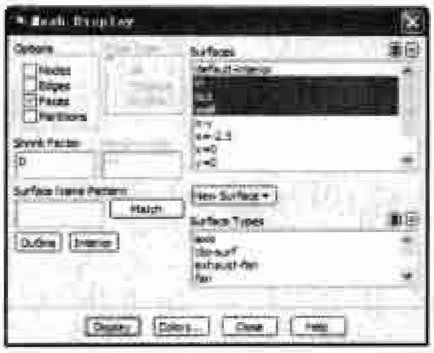


图 11-5　Mesh Display 对话框



图 11-6　第一次壁面显示

（6）单击 Graphics and Animations 面板最下方的 Lights 按钮，弹出如图 11-7 所示的 Lights 对话框。选中 Light On 和 Headlight On 两个复选框，单击 Apply 按钮。视图窗口的壁面颜色发生改变，如图 11-8 所示。

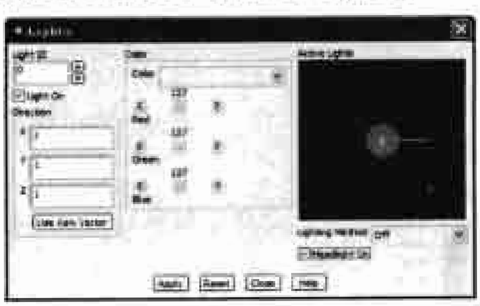


图 11-7　Lights 对话框



图 11-8　第二次壁面显示

（7）单击 Graphics and Animations 面板下方的 Scene 按钮，弹出如图 11-9 所示的 Scene Description 对话框。选择 Names 列表框中的 wall、out 和 in 选项，单击 Display 按钮，弹出如图 11-10 所示的 Display Properties 对话框。在 Visibility 栏中选中 Visible、Lighting 和 Faces 复选框，设置 Transparency 为 60，单击 Apply 按钮，可以看到视图窗口中的壁面呈现透明显示，如图 11-11 所示。然后单击两次 Close 按钮，关闭 Display Properties 对话框和 Scene Description 对话框。

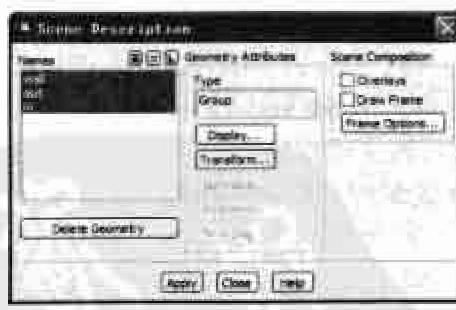


图 11-9　Scene Description 对话框

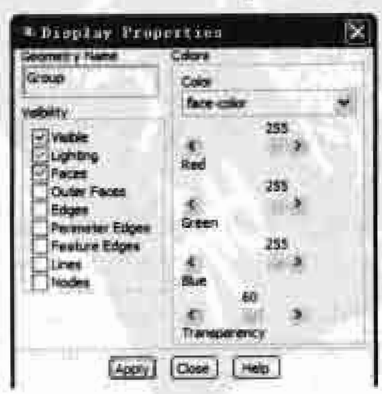


图 11-10　Display Properties 对话框



图 11-11　第三次壁面显示

（8）回到 Contours 对话框，再次单击 Display 按钮，即可发现视图窗口中的压强云图与第一次显示的不一样，此时的压强云图与渲染的透视管同时显示，方便读者判断各剖面的位置，如图 11-12 所示。

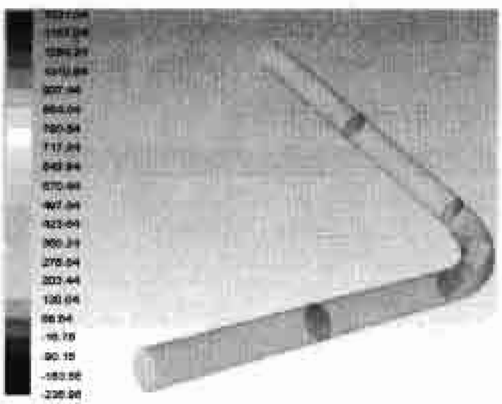


图 11-12　第二次 5 个剖面的压强云图显示

（9）在 Contours 对话框中，在 Contours of 栏中选择 Velocity 和 Velocity Magnitude 选项，单击 Display 按钮，可得到如图 11-13 所示的速度云图。若同时选择 Surfaces 列表框中的 in、out、zh、x-y、x=-2.5、x=0、y=0 和 y=2.5 选项，单击 Display 按钮，可得如图 11-14 所示的速度云图。

（10）单击 Graphics and Animations 面板下方的 Lights 按钮，弹出 Lights 对话框，取消选中 Light On 和 Headlight On 复选框，单击 Apply 按钮。回到 Contours 对话框，选择 Surfaces 列表框中的 zh 选项，单击 Display 按钮，可得到管轴剖面的速度云图，如图 11-15 所示。若此时取消选中 Options 栏中的 Filled 复选框，再次单击 Apply 按钮，则可得到如图 11-16 所示的管轴剖面的速度等值线图。接着改变 Contours of 栏中的选项为 Velocity 和 Vorticity Magnitude，单击 Apply 按钮，得到如图 11-17 所示的管轴剖面的涡量等值线图。

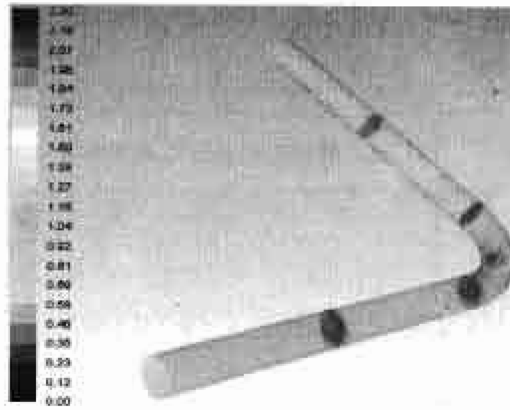


图 11-13　5 个剖面的速度云图



图 11-14　速度云图

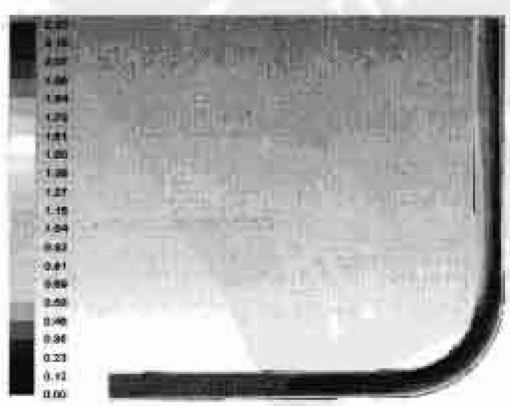


图 11-15　管轴剖面的速度云图

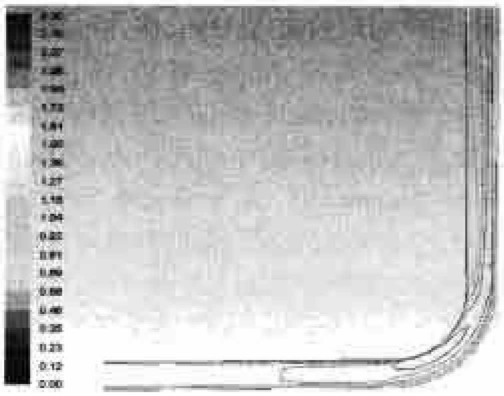


图 11-16　管轴剖面的速度等值线图

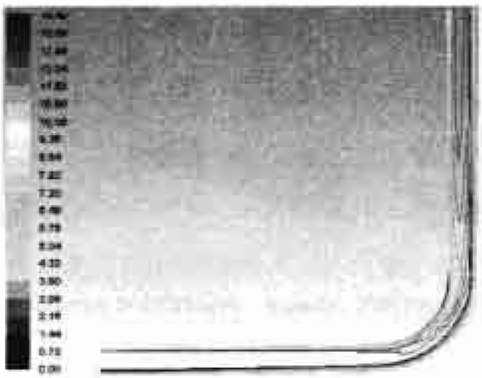


图 11-17　管轴剖面的涡量等值线图

（11）双击 Graphics and Animations 面板中的 Vectors 选项，弹出如图 11-18 所示的 Vectors 对话框，选择 Surfaces 列表框中的 zh 选项，保持其余默认设置，单击 Display 按钮，则得到如图 11-19 所示的速度矢量图。



图 11-18　Vectors 对话框



图 11-19　管轴剖面的速度矢量图

（12）在 Graphics and Animations 面板中双击 Pathlines 选项，弹出如图 11-20 所示的 Pathlines 对话框，选择 Release from Surfaces 为 in，设置 Steps 为 500、Step Size(m)为 0.05、Path Skip 为 5，单击 Display 按钮，得到如图 11-21 所示的迹线图。

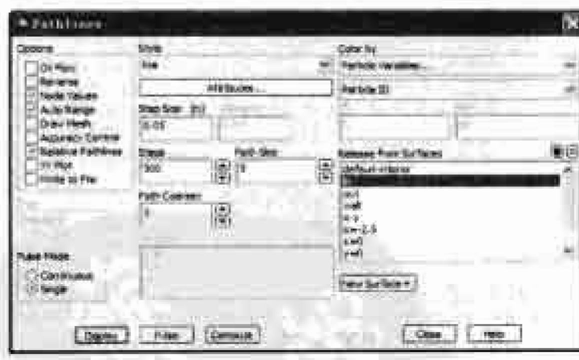


图 11-20　Pathlines 对话框

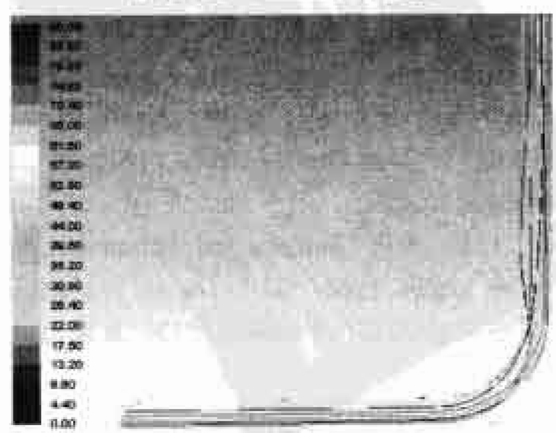


图 11-21　迹线图

（13）选择操作面板中 Results 下的 Plots 选项，展开 Plots 面板。选择其中的 XY Plot 选项，单击 Set Up 按钮，弹出如图 11-22 所示的 Solution XY Plot 对话框，选中 Options 栏中的 Position on X Axis 复选框，选择 Y Axis Function 为 Pressure 和 Static Pressure，选择 Surfaces 为 zh，单击 Plot 按钮，则可在视图窗口中得到静压在管轴剖面 *X* 方向上的分布，如图 11-23 所示。

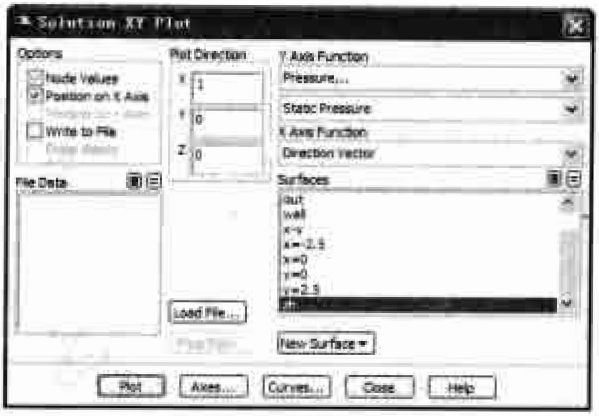


图 11-22　Solution XY Plot 对话框

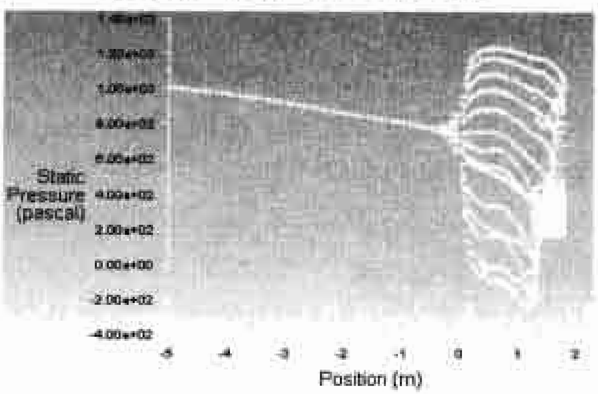


图 11-23　静压在管轴剖面 *X* 方向上的分布

（14）此时，单击 Solution XY Plot 对话框中的 Axes 按钮，弹出如图 11-24 所示的 Axes-Solution XY Plot 对话框，选择 Axis 为 X，设置其 Type 为 float（浮点数），Precision 为 2，单击 Apply 按钮。然后选择 Axis 为 Y，设置其 Type 也为 float，Precision 为 2，单击 Apply 按钮。最后单击 Close 按钮，退出该对话框。

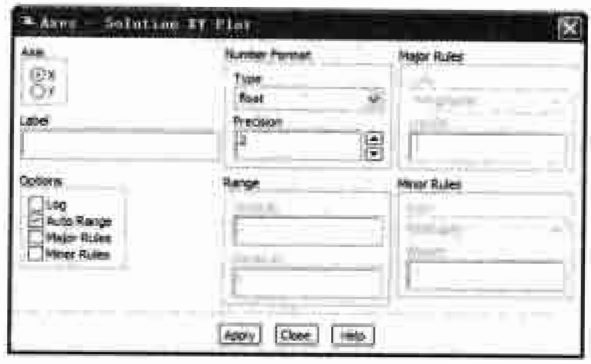


图 11-24　Axes-Solution XY Plot 对话框

（15）回到 Solution XY Plot 对话框，再次单击 Plot 按钮，此时的压强曲线如图 11-25 所示，坐标为保留两位小数的浮点数。

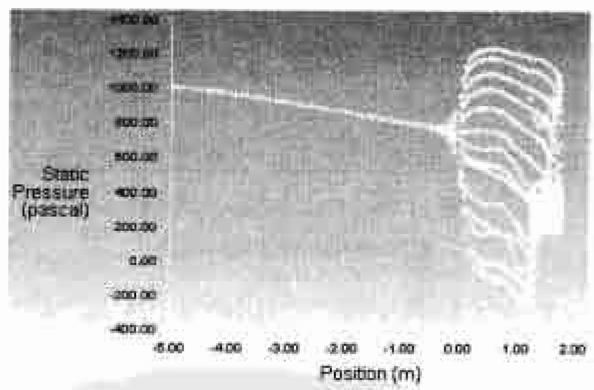


图 11-25　坐标轴数值为浮点数的压强分布

（16）选择操作面板中 Results 下的 Reports 选项，在 Reports 列表框中选择 Fluxes 选项，单击 Set Up 按钮，弹出如图 11-26 所示的 Flux Reports 对话框，选择 Boundaries 列表框中的 in 和 out 选项，单击 Compute 按钮，在 Results 列表框中呈现进出口流量的计算结果，并在右下角显示流量差。若流量差较小，证明进出口流量保持平衡，符合质量守恒定律。

（17）在图形分析的过程中，若想复制视图窗口中的图形，可右击视图窗口的蓝色标题栏，弹出的快捷菜单如图 11-27 所示。

（18）在图 11-27 所示的菜单中选择 Page

Setup 命令，弹出 Page Setup 对话框，可在其中设置保存图形的色彩、格式及进行图形反色设置等。这里按图 11-28 所示进行设置，单击 OK 按钮。

（19）再次右击视图窗口中的蓝色标题栏，在弹出的快捷菜单中选择 Copy to Clipboard 命令，即将视图窗口中的图像复制到剪贴板中。若在 Word 中按 Ctrl+V 键，则可得到如图 11-29 所示的图形。

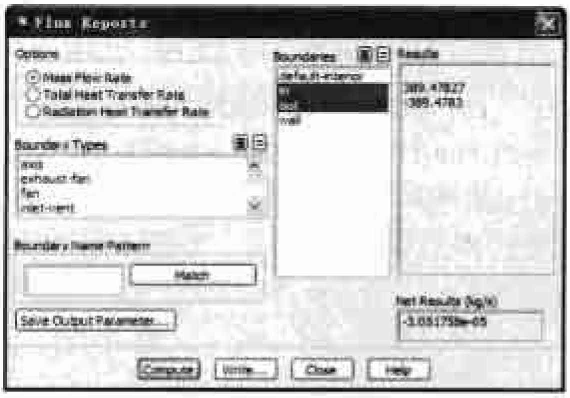


图 11-26 Flux Reports 对话框



图 11-27 图形保存菜单

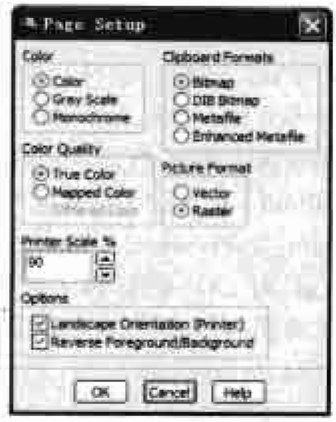


图 11-28 Page Setup 对话框

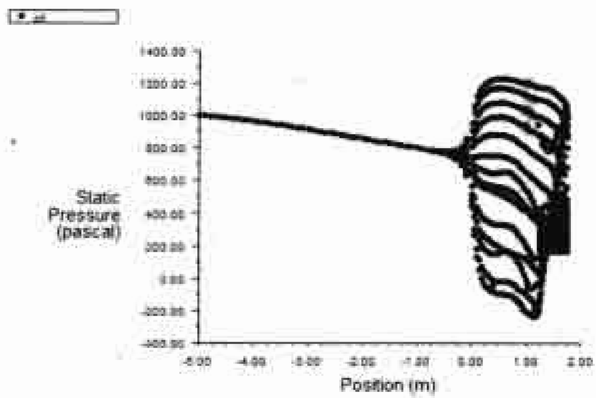


图 11-29 导入 word 中的图形

（20）后处理完后，选择 File→Exit 命令，安全退出 FLUENT 12。

11.2 FLUENT 12 后处理

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch11\11-2.avi 文件。

FLUENT 除了可以将流场分布以云图、等值线图和矢量图等形式呈现出来，帮助用户分析相关流动参数的变化外，还可以得到边界流量、作用力、投影面积、面积分与体积分等文字报告，这些功能均通过 Results 面板实现。如图 11-30 所示，Results 面板分为 3 个部分，Graphics and Animations 面板用于生成云图、等值线图、矢量图、迹线图和颗粒轨迹图等，Plots 面板用于生成曲线图、方柱图和频谱分析图等，Reports 面板用于生成流量、力、面积分和体积分等文字报告。

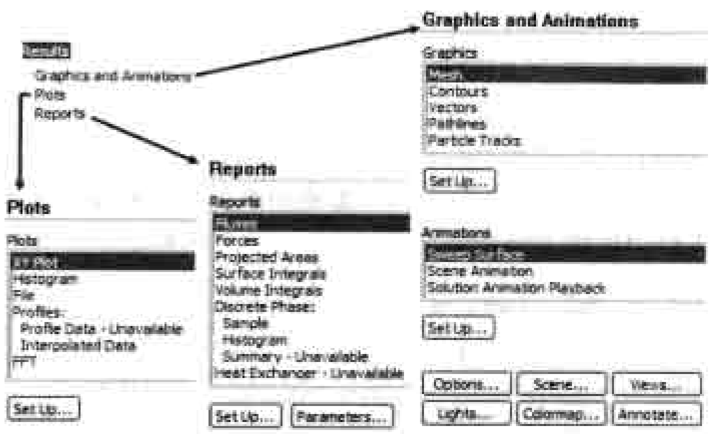


图 11-30 Results 面板

11.2.1 Graphics and Animations 面板

1. 网格

双击 Graphics and Animations 面板中 Graphics 列表框中的 Mesh 选项，将弹出如图 11-31 所示的 Mesh Display 对话框。

Mesh Display 对话框的 Options 栏中的 Nodes、Edges、Faces 和 Partitions 复选框代表网格显示时的形式；Edge Type 为边显示的形式，可以全部显示（All），也可以轮廓显示（Outline）或部分显示（Feature）；Surfaces 列表框中的选项为待选的被显示区域；Surfaces Types 列表框为显示区域的类型。单击 Display 按钮即可在视图窗口中显示计算网格。

若单击对话框下方的 Colors 按钮，将弹出如图 11-32 所示的 Mesh Colors 对话框，用户可以设置不同类型边界或区域的显示颜色，Types 列表框中为待选的边界或区域，Colors 列表框中为待选的颜色。若颜色设置不合适，还可以单击 Reset Colors 按钮重置颜色。

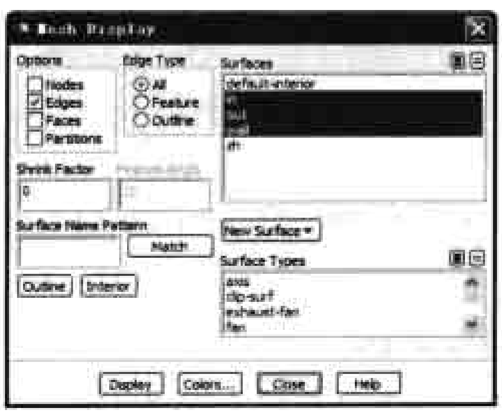


图 11-31 Mesh Display 对话框



图 11-32 Mesh Colors 对话框

2. 云图与等值线图

双击 Graphics and Animations 面板中 Graphics 列表框中的 Contours 选项，将弹出如图 11-33 所示的 Contours 对话框，其中的 Contours of 栏为待选的物性参数，第一行下拉列表框中主要包括

速度（Velocity）、压强（Pressure）、温度（Temperature）和密度（Density）等物性参数，如图 11-34 所示。第二行下拉列表框中为要显示物性参数的二级细化分类，如压强（Pressure）还分有静压（Static Pressure）、压力系数（Pressure Coefficient）、动压（Dynamic Pressure）、绝对压强（Absolute Pressure）、总压（Total Pressure）和相对总压（Relative Total Pressure）6 个子类，如图 11-35 所示。对话框中的 Phase 下拉列表框中为相的选择，单相流动时不需要选择，若为多相流动，可以在下拉列表框中选择混合相或各单相，如图 11-36 所示。



图 11-33　Contours 对话框

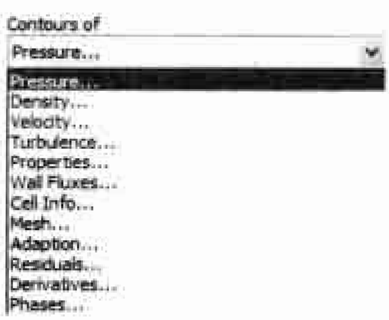


图 11-34　Contours of 栏中的第一行下拉列表框

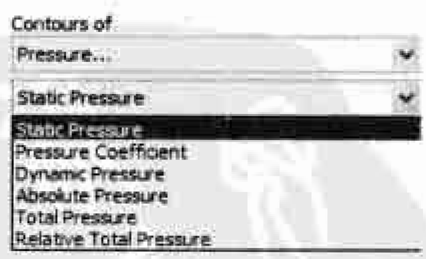


图 11-35　Contours of 栏中的第二行下拉列表框

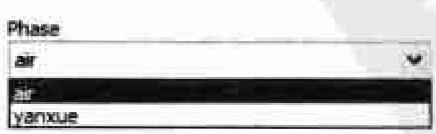


图 11-36　Phase 下拉列表框

对话框中的 Surfaces 列表框中为待选择的面，通常包含边界定义时的进出口及壁面等，用户还可以自定义相关的切面或截面。对于二维问题，通常不需要选择 Surfaces，因为二维问题本身就是一个面。Surface Types 为面的类型，当要显示的面唯一确定时，可以不用对其类型进一步定义。

Contours 对话框左侧 Options 栏中的 Filled 复选框被选中时，则显示的为云图，若取消选中 Filled 复选框则显示的为等值线图。如第 6 讲中的实例・模仿中空气的速度云图与等值线图如图 11-37 与图 11-38 所示。当选中 Options 栏中的 Auto Range 复选框时，图形值为全范围显示，若取消选中 Auto Range 复选框，则系统自动选中 Clip to Range 复选框，需要用户在 Max 与 Min 数据输入框中输入要显示的上下限。如设置实例 6-1 空气的速度上限为 4m/s，下限为 2m/s，得到的速度云图如图 11-39 所示。

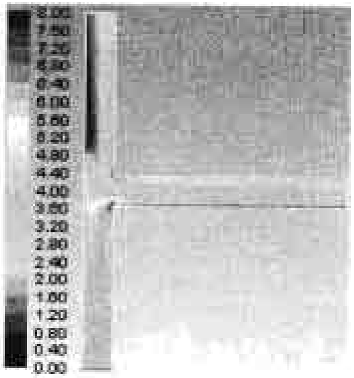


图 11-37　第 6 讲中实例・模仿的速度云图

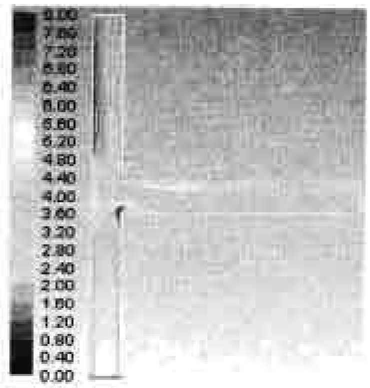


图 11-38　第 6 讲中实例・模仿的速度等值线图

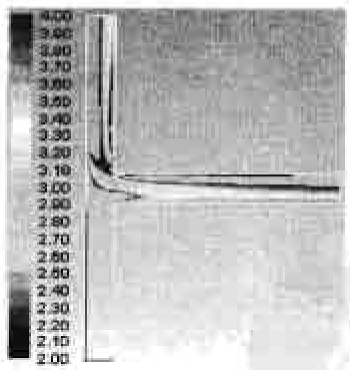


图 11-39　改变上下限后的速度云图

3. 速度矢量图

双击 Graphics and Animations 面板中 Graphics 列表框中的 Vectors 选项，将弹出如图 11-40 所示的 Vectors 对话框，该对话框与 Contours 对话框相似，但 Vectors of 下拉列表框中只有 Velocity 和 Relative Velocity 两个选项。此外，Color by 栏的下拉列表框中包含 Pressure、Density 和 Velocity 等常用参数，当用户选择其中一个时，矢量图的数值即与所选参数的数值对应，由于各参数的取值范围不一，所以颜色呈现也不一样。对话框中的 Surfaces、Surface Types 与 Contours 对话框一样，均为待显示的区域及区域的类型。同样，Options 栏中 Auto Range 复选框的用法也与云图显示时一致。

对话框中的 Scale 用于改变箭头的大小，Skip 用于改变箭头的密度，用户可以调节 Scale 及 Skip 以得到更为清晰的矢量图。当默认 Style 为 arrow、Scale 为 1、Skip 为 0 时，第 6 讲的实例・模仿中空气的速度矢量图如图 11-41 所示。当设置 Scale 为 6、Skip 为 8 时，速度矢量图如

图 11-42 所示。Style 下拉列表框中除了 arrow（标准箭头）外，还有 cone（圆锥体）、filled-arrow（实心箭头）、harpoon（鱼叉）和 headless（无头线）等类型，如图 11-43 所示。

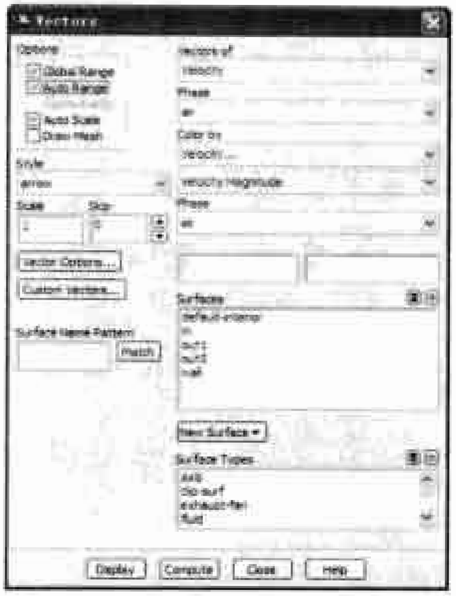


图 11-40 Vectors 对话框

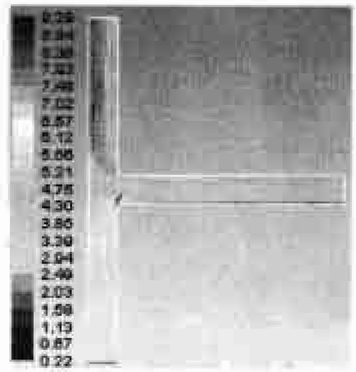


图 11-41 第 6 讲中实例·模仿的速度矢量图

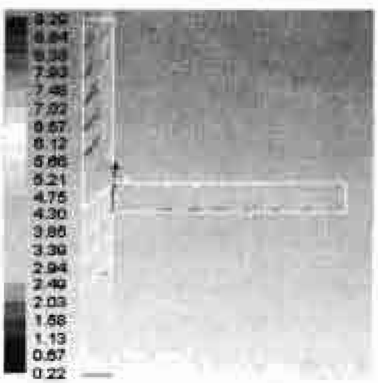


图 11-42 改变 Scale 与 Skip 后的速度矢量图

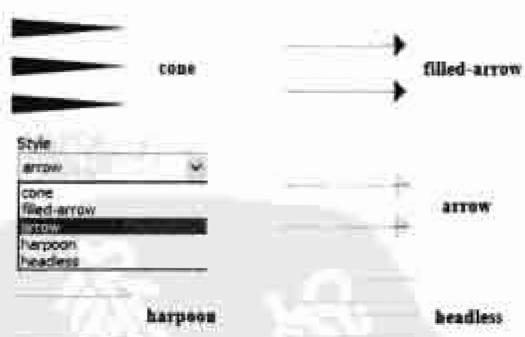


图 11-43 矢量箭头的种类

4. 迹线图

双击 Graphics and Animations 面板中 Graphics 列表框中的 Pathlines 选项，将弹出如图 11-44 所示的 Pathlines 对话框。

对话框中 Style 下拉列表框中为迹线的类型，包括直线、点、箭头线和间断线等；Release from Surfaces 列表框中为粒子轨迹的初始源面；Step Size(m)为长度间隔，用于计算下一微粒的位置；Steps 为步数，通常应为一个微粒能够前进的最大步数，Step Size(m)与 Steps 的乘积近似等于路径长度。Path Skip 为迹线的疏密程度设置，为 0 时最密，数值越大则越疏。

如第 6 讲中的实例·模仿，设置 Style 为 line，设置 Step Size(m)为 0.01、Steps 为 1000、Path Skip 保持为 0，在 Release from Surfaces 列表框中选择 in 选项，单击 Display 按钮，得到如图 11-45 所示的迹线图。



图 11-44 Pathlines 对话框

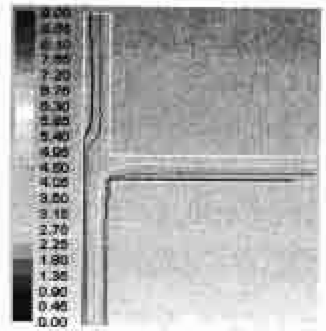


图 11-45 第 6 讲中实例・模仿的迹线图

5. 颗粒轨迹图

双击 Graphics and Animations 面板中 Graphics 列表框中的 Particle Tracks 选项，将弹出如图 11-46 所示的 Particle Tracks 对话框。

对话框中 Options 栏中的选项和 Style 类型与 Pathlines 对话框相同；Reporting 栏中的选项用于文本报告的显示，Off 为不显示，Summary 为整体显示，Step by Step 为一步步显示；Release from Injections 列表框中为待选的射流源；Skip 为疏密设置；Track Single Particle Stream 选项为单个颗粒的跟踪。

如第 7 讲的实例・操作，选择 Release from Injections 为 injection-0，其余保持默认，单击 Display 按钮，得到如图 11-47 所示的固相颗粒轨迹。

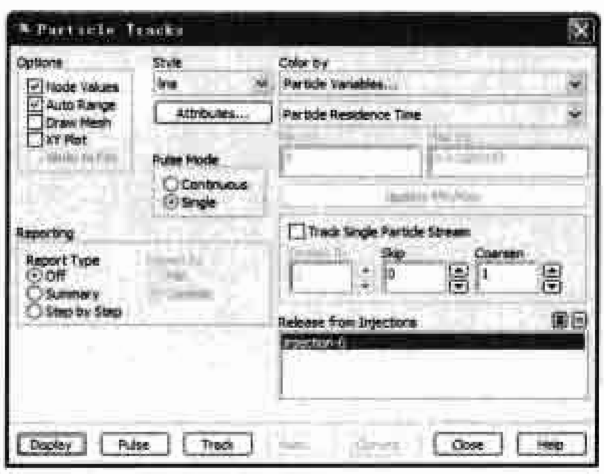


图 11-46 Particle Tracks 对话框

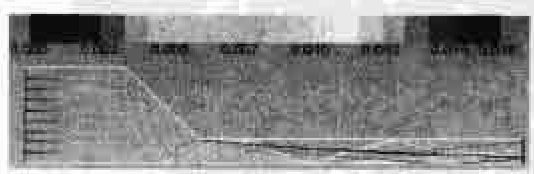


图 11-47 第 7 讲中实例・操作的固相颗粒轨迹图

11.2.2 Plots 面板

1. XY 散点及曲线图

有时除了需要显示形象直观的云图、矢量图之外，还需要显示相关变量的坐标曲线图。这

时，可以双击 Plots 面板中 Plots 列表框中的 XY Plot 选项，弹出如图 11-48 所示的 Solution XY Plot 对话框。

Options 栏中的 Position on X Axis 表示在 *X* 轴显示坐标位置；Plot Direction 栏中的 X、Y、Z 表示变量分布的方向，当 X 为 1 时，即显示沿 *X* 方向的变化情况；Y Axis Function 栏的下拉列表框中为待显示的相关变量；Surfaces 列表框中为待选的区域。

单击 Solution XY Plot 对话框中的 Axes 按钮，则会弹出如图 11-49 所示的 Axes-Solution XY Plot 对话框，在该对话框中用户可以设置 *X*、*Y* 轴的数值范围（Auto Range 为全范围显示）和坐标轴数值的显示格式（浮点数、整数等）。

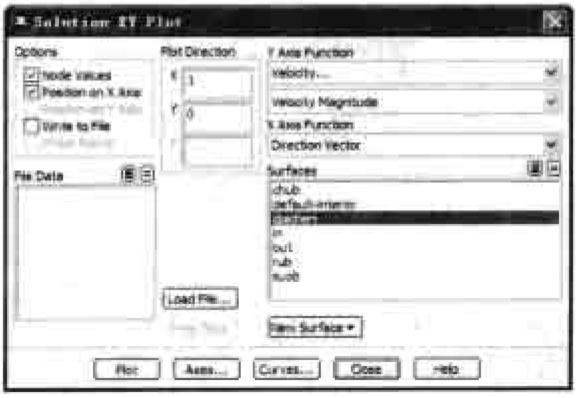


图 11-48 Solution XY Plot 对话框

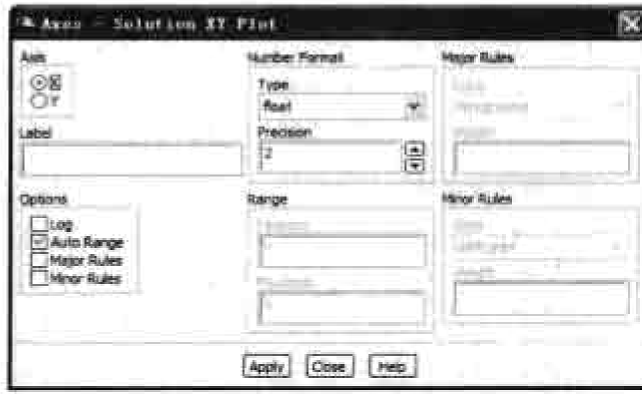


图 11-49 Axes-Solution XY Plot 对话框

单击 Solution XY Plot 对话框中的 Curves 按钮，可弹出如图 11-50 所示的 Curves-Solution XY Plot 对话框，该对话框可以帮助设置散点及曲线的颜色、显示方式和大小等。

如第 7 讲的实例・操作，在 Y Axis Function 栏的下拉列表框中选择 Velocity 和 Velocity Magnitude 选项，并选择 Surfaces 列表框中的 duichen 选项，设置坐标轴的值为浮点数，保持其余默认设置，单击 Plot 按钮，可得到如图 11-51 所示的速度沿对称轴的分布曲线。



图 11-50 Curves-Solution XY Plot 对话框

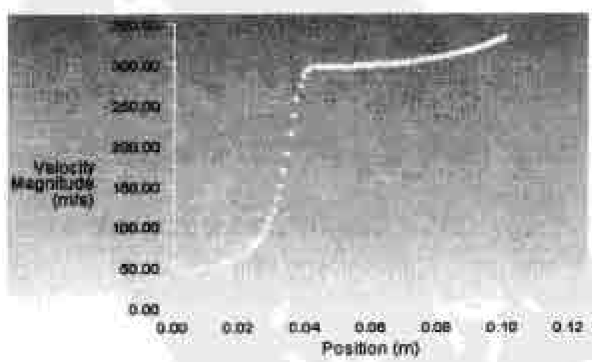


图 11-51 第 7 讲中实例・操作的速度分布曲线

2. 柱状图

双击 Plots 面板中 Plots 列表框中的 Histogram 选项，弹出如图 11-52 所示的 Histogram 对话框。Histogram of 栏的下拉列表框中为待选的变量参数，Divisions 为柱状条的个数，默认为 10 条（即将 *X* 轴 10 等分），Zones 列表框中为待选的区域，Zone Types 列表框中为区域类型。

如第 7 讲的实例·操作，选中 Histogram 对话框中 Options 栏中的 Auto Range 和 Global Range 复选框，在 Histogram of 栏的下拉列表框中选择 Velocity 和 Velocity Magnitude 选项，选择 Zones 列表框中的 duichen 选项，保持 Divisions 中的 10，单击 Plot 按钮，可得到如图 11-53 所示的速度柱状图。



图 11-52 Histogram 对话框

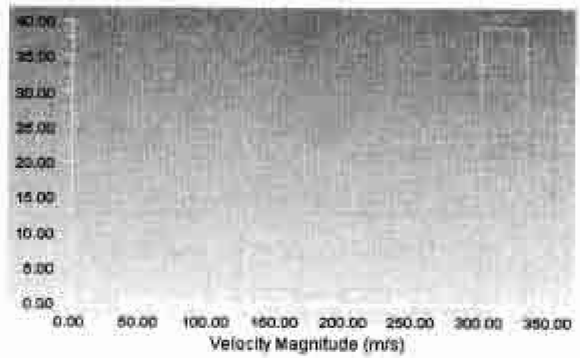


图 11-53 第 7 讲中实例·操作的速度柱状图

11.2.3 Reports 面板

1. 边界流量报告

FLUENT 可以生成所选边界区域上的质量流量、热流量和辐射传热量。

◆ 边界上的质量流量由边界区域各个网格面上的质量流量相加得到，各个面的质量流量等于密度乘以法向速度再乘以所在平面的投影面积。

◆ 边界上的总热流量由各个面的热流量相加得到。各个面的热流量等于对流传热与辐射换热之和。热流量的计算与计算中设置的边界条件有关。根据模型的不同，总的热流量可能包含对流传热、焓的对流通量和能量的扩散通量等。

◆ 边界上的辐射换热量等于每个面上的辐射换热量之和。辐射换热量的计算取决于计算中所使用的辐射模型。

提示：FLUENT 在质量和热量平衡计算时，仅考虑的是穿过边界而进入和离开主体的流动，不包括用户定义的体积源或颗粒喷射的作用。因此，可能出现质量或热量不守恒的情况。那么，为了判定一个包含离散相的解是否收敛，读者可以把边界流量计算的数值与粒子轨迹报告中得到的质量和热量改变的数值相比较，若两者相等，就可以认为满足守恒条件。

生成流量报告的步骤很简单，选择操作面板中 Results 下的 Reports 选项，在展开面板的 Reports 列表框中选择 Fluxes 选项，单击 Set Up 按钮，即弹出如图 11-54 所示的 Flux Reports 对话框，Options 栏中包含了 Mass Flow Rate（质量流量）、Total Heat Transfer Rate（总热流量）和 Radiation Heat Transfer Rate（辐射换热量）3 个复选框，Boundaries 列表框中为待选的获取流量数据的边界区域。对于第 7 讲的实例·操作，选择计算进出口边界（in 和 out）的质量流量，单击 Compute 按钮可得到边界上的流量数值，并于右下方显示流量总和的结果。另外，在文本界面中也会显示计算结果的详细信息，如图 11-55 所示。



图 11-54　Flux Reports 对话框

```
        Mass Flow Rate                  (kg/s)
-------------------- --------------------
                  in              26.644176
                 out             -26.581816
-------------------- --------------------
                 Net            0.062360764
```

图 11-55　文本界面中的流量计算信息

2. 边界作用力报告

FLUENT 可以计算和报告指定方向的作用力及选择区域对指定中心位置的力矩。

- 边界上的作用力是通过每个边界网格面上的压力和粘性力与指定方向矢量的标量积相加得到。除了计算压力、粘性力和合力外，还可以用 Reference Values 面板中的参考值计算作用力系数，作用力系数被定义为作用力与单位体积动能（$0.5\rho v^2 A$）的商，其中 ρ、v、A 为 Reference Values 数据输入框中给定的密度、速度和面积。
- 力矩为通过每个网格面上作用力的力矩矢量和。除了压力、粘度和力矩分量外，还可以计算力矩系数。力矩系数被定义为力矩与参考动压、参考面积和参考长度的商。

双击 Results 面板 Reports 列表框中的 Forces 选项，弹出如图 11-56 所示的 Force Reports 对话框，Options 栏中包含 Forces（作用力）、Moments（力矩）和 Center of Pressure（压力中心）3 个单选按钮。若要生成作用力报告，需要在 Direction Vector（作用力矢量）栏中指定作用力方向的 X、Y、Z 分量；若要生成力矩报告，需要在 Moment Center（力矩中心）指定力矩中心的 X、Y、Z 的坐标。Wall Zones 列表框中为需要计算的待选边界。单击 Print 按钮即可在文本界面中生成相应的力或力矩报告。第 4 讲中实例 • 模仿的作用力报告如图 11-57 所示。

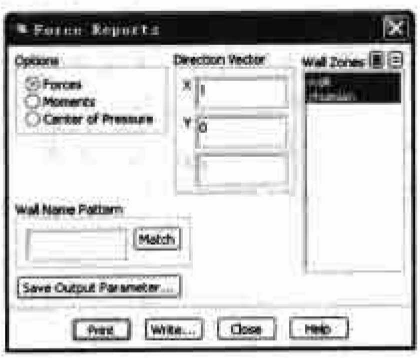


图 11-56　Force Reports 对话框

```
Coefficients
Pressure              Viscous               Total
0                     0.037116526           0.037116526
0.020169581           0.0053003923          0.025469973
--------------------- --------------------- ---------------------
0.020169581           0.042416919           0.0625865
```

图 11-57　文本界面中的作用力计算信息

3. 投影面积计算

双击 Results 面板 Reports 列表框中的 Projected Areas 选项，弹出如图 11-58 所示的 Projected Surface Areas 对话框，用户可利用该对话框计算指定的面沿 X、Y 或 Z 方向的投影面积，其中

Projection Direction 栏中为要选择的投影方向（X、Y 或 Z），Surfaces 列表框中为要计算投影面积的待选区域，Min Feature Size(m)为最小特征尺寸，用于指定选择面中的最小几何构形长度（若不能确定最小几何特征尺寸，也可以使用默认值），单击 Compute 按钮，计算值就会出现在 Area(m^2)数据输入框和文本界面中。第 10 讲中实例・模仿的 default-interior 沿 Z 方向的投影面积为 $2m^2$，如图 11-59 所示。



图 11-58　Projected Surface Areas 对话框

```
  Allocating 9x9=81 pixel map.
60 pixels filled, area = 0.148932

Area of surface (0) projected onto plane (1, 0, 0): 0.14893164

  Allocating 9x101=909 pixel map.
800 pixels filled, area = 1.98576

Area of surface (0) projected onto plane (0, 1, 0): 1.9857551

  Allocating 101x9=909 pixel map.
800 pixels filled, area = 2

Area of surface (0) projected onto plane (0, 0, 1): 2
```

图 11-59　文本界面中的投影面积计算信息

4. 表面积分的计算

FLUENT 可以计算特定面上的场变量，如面积或质量流率、面积加权平均、质量加权平均、面平均、面最大值和最小值、顶点平均、顶点最大值和最小值等。面是数据点的集合，这些面可能是计算模型中创建的，也可能是用户在后处理过程中定义的。

由于面可以被任意放置在流场中，因此每个数据点处的变量都是由节点值线性内插值得到的。对于一些变量在网格节点上的值，可以由求解器直接计算得出，而另一些变量在网格节点上的值，则通过对网格中心处的值取平均得到。

双击 Results 面板 Reports 列表框中的 Surface Integrals 选项，弹出 Surface Integrals 对话框，Report Type 下拉列表框中为要计算的对象，Field Variable 下拉列表框中为要计算表面积分的场变量，Surfaces 列表框中为要选择的面，单击 Compute 按钮则在右下角结果显示栏和文本界面中同时显示计算结果。第 10 讲中实例・模仿的进口的质量流率计算如图 11-60 所示。

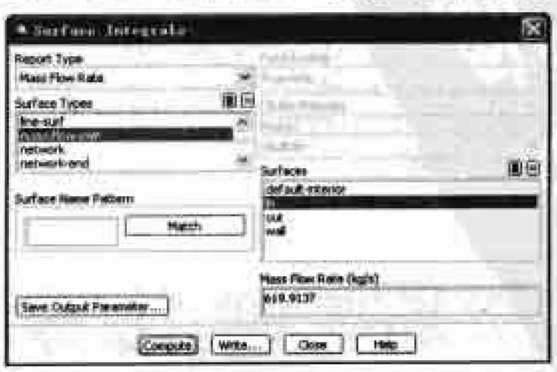


图 11-60　Surface Integrals 对话框

5. 体积分的计算

体积分计算与面积分方法相同，主要可以获得指定网格区域的体积或指定变量的体积积分、体积加权平均、质量加权积分和质量加权平均。双击 Results 面板中 Reports 列表框中的 Volume

Integrals 选项，弹出 Volume Integrals 对话框，Report Type 栏中为要选择计算的类型，Field Variable 下拉列表框中为计算所需的积分对象，Cell Zones 列表框中为要计算的区域，单击 Compute 按钮则得到相应的计算值。如第 10 讲中的实例・模仿，其压力最大值计算结果如图 11-61 所示。

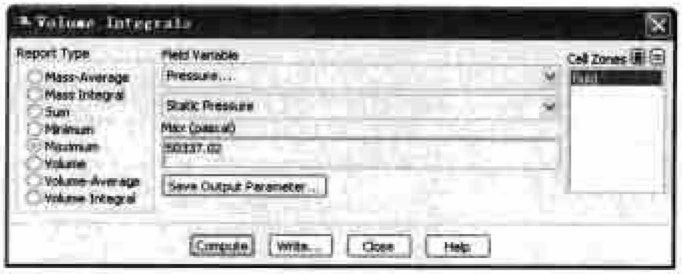


图 11-61　Volume Integrals 对话框

11.3　Tecplot 后处理

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch11\11-3.avi 文件。

11.3.1　FLUENT 数据的调入

打开 Tecplot，选择 File→Import 命令，弹出如图 11-62 所示的 Select Import Format 对话框，其中可供选择的数据类型有 12 种，常用的有如下几种。

- CGNS 格式，计算流体力学通用注释系统格式。
- DEM 格式，数字评价图格式。
- DXF 格式，数字交换格式。
- Excel 表格式。
- FLUENT 格式。
- Gridgen 格式。
- HDF 格式，层级数据格式。
- Image 文件格式，映像文件格式。
- PLOT3D 文件格式。
- Text spreadsheet 格式，文字表单格式。

若要调入 FLUENT 数据，需要选择 Select Import Format 对话框中的 FLUENT Data Loader 选项，单击 OK 按钮，弹出如图 11-63 所示的 FLUENT Data Loader 对话框，其上侧的 4 个选项如下。

- Load Case and Data Files：加载工程和数据文件。
- Load Case File Only：只加载工程文件。
- Load Residuals Only：只加载残差数据。
- Load Multiple Case and Data Files：加载多个工程和数据文件。



图 11-62　Select Import Format 对话框



图 11-63　FLUENT Data Loader 对话框

Options 栏中为辅助选项，可以实现只加载单元和边界，只加载单元或只加载边界。在导入 FLUENT 数据时，通常用到的是 Load Case and Data Files，在 Options 栏中选中 Load Cells and Boundaries 单选按钮，然后在 Case File 和 Data File 文本输入框中输入加载文件的详细路径，或者单击“…”按钮，从硬盘上选择要加载的文件。

对于某些需要特殊分析的数据，需要事先从 FLUENT 中导出来，再调入到 Tecplot 中进行后处理。在 FLUENT 中，选择 File→Export→Solution Data 命令，弹出如图 11-64 所示的 Export 对话框，其最左侧的 File Type 列表框中为待选的输出文件格式，最后一个即是 Tecplot 数据格式，除此之外，还支持 ABAQUS、ANSYS Input、ASCII、AVS、NASTRAN 和 PATRAN 等常用软件的数据格式；对话框中间的 Surfaces 列表框中为待输出数据的区域；对话框右侧的 Quantities 列表框中为要输出的变量，包括常用的 Pressure、Density、Velocity Magnitude 和 Stream Function 等。选择好相应的区域及变量后，单击 Write 按钮，即可把对应的数据输出为 Tecplot 格式的文件。文件输出后，可在 Tecplot 中通过选择 File→Load Data File(s)命令，调入刚输出的数据文件来进行处理。

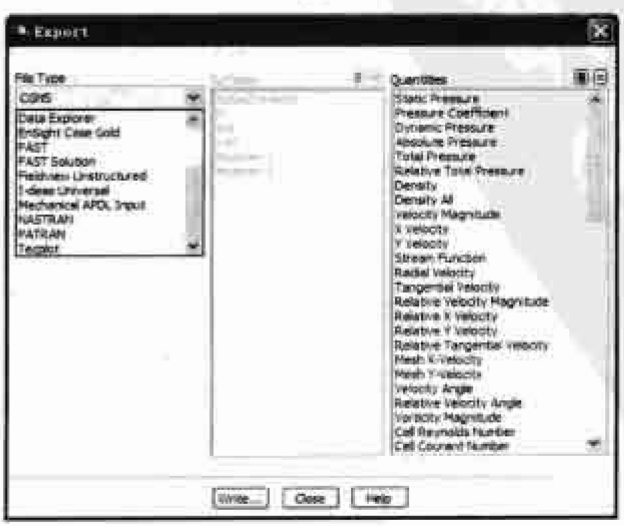


图 11-64　Export 对话框

11.3.2 Tecplot 绘图环境设置

Tecplot 默认的绘图环境可以满足大部分绘图的需要，但修改绘图环境可以提供更多的选择，使所绘制的图形更加丰富多彩。

1. 帧的创建和编辑

在默认设置中，工作区仅有一个绘图帧，用户可以单击工具栏上的▭按钮，或者选择 Frame→Create New Frame 命令，此时鼠标光标变成十字线形状，用户只需在工作区中按住鼠标左键并拖动即可创建出一个新的绘图帧，如图 11-65 所示。

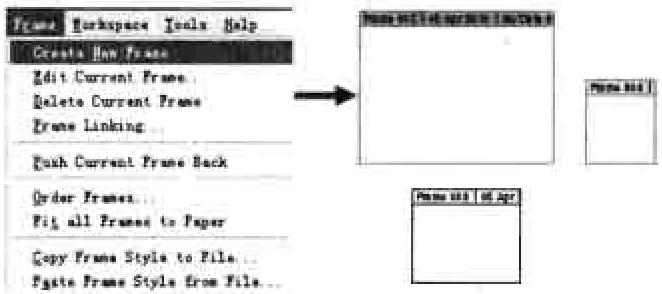


图 11-65 创建新的绘图帧

创建帧后，可以对其进行移动、删除及改变尺寸等操作。首先用鼠标单击帧的标题栏，选中帧时其边界会出现 8 个黑色方块，移动鼠标光标到边界上，光标形状变成十字箭头，按住鼠标左键并拖动即可实现移动操作，如图 11-66 所示。若移动鼠标光标到黑色方块上，光标变成双向箭头，按住鼠标左键并拖动可以调整帧的大小。另外，在选中帧的状态下，按 Delete 键，可以删除当前帧。

双击帧的标题栏可以打开如图 11-67 所示的 Edit Current Frame 对话框。在对话框的 Left、Width、Top Side 和 Height 数据输入框中可以输入帧的左边位置、宽度、上边位置和高度，中部的 3 行分别对应边界、标题栏和背景的显示与否及宽度或颜色的编辑，下部的 Frame Name 文本输入框中可以输入帧的名称。

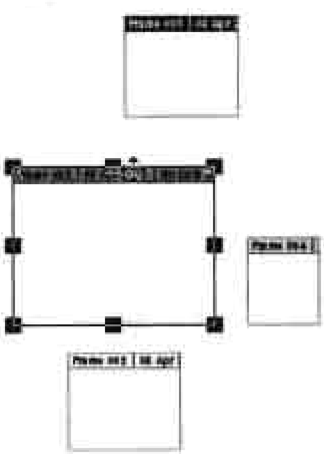


图 11-66 移动帧



图 11-67 Edit Current Frame 对话框

2. 背景网格与标尺的设定

背景网格是将帧横向和竖向均分为若干等份的辅助线，主要用于绘图对象的定位，如用户在添加文本和几何图形时可以选择对齐到网格。标尺主要给放大或缩小对象提供方便，其显示单位可以选择为厘米（cm）、英寸（in）和点数（pt）。

选择 Workspace→Ruler/Grid 命令，弹出如图 11-68 所示的 Ruler/Grid 对话框，用户可在其中进行背景网格和标尺的设定，选中 Show Grid 复选框表示显示网格，Grid Spacing 为网格间距，Show Ruler 为显示标尺，Ruler 为标尺的间距，读者可根据实际需要进行相应设置。

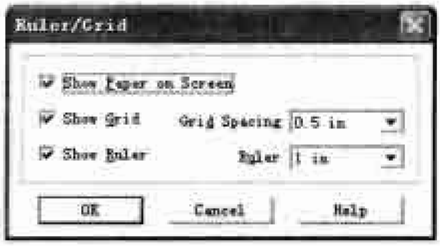


图 11-68 Ruler/Grid 对话框

3. 坐标系统

Tecplot 提供了多个坐标系统，其中工作纸、帧、2D 和 3D 坐标系统最为重要。4 种坐标系的相互关系及原点位置如图 11-69 所示，其中 2D、3D 坐标系统是根据数据集合进行绘制的坐标系统，二维问题通常选择 2D 坐标系统，而三维问题可选 2D 也可选 3D 坐标系统。帧坐标系的长宽比例可以任意调节，但是取值范围限于 0~100 之间。

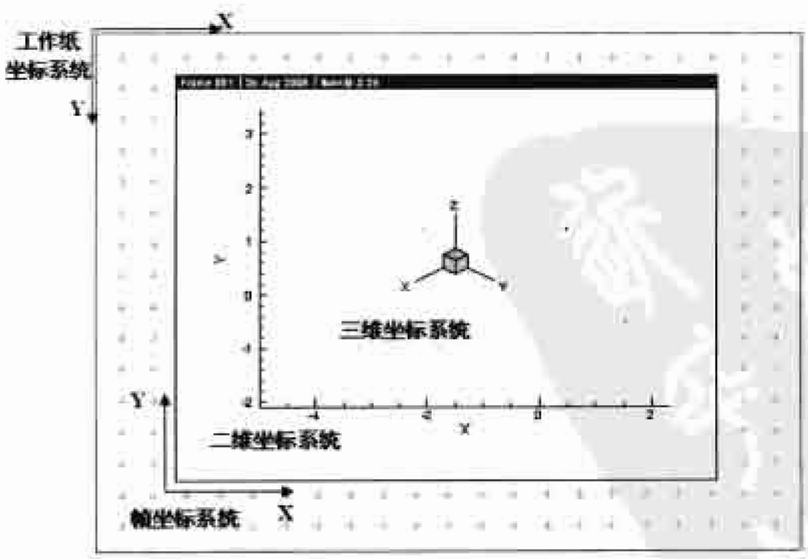


图 11-69 Tecplot 坐标系统

11.3.3 Tecplot 的后处理功能

Tecplot 的图形及可视化技术功能强大，可以绘制云图、等值线图、矢量图、迹线图和曲线

图等，下面分别对其进行介绍。

1. 云图

打开 Tecplot 软件，选择 File→Load Data file(s)命令，调入 Tecplot 安装目录下的“Demo\2D\nozzle.plt”，此时帧窗口如图 11-70 所示，可以看到该物体的网格。接着在 Tecplot 工具栏中取消选中 Mesh 复选框，选中 Contour 复选框，此时会弹出如图 11-71 所示的 Contour Details 对话框，选择 Var 下拉列表框中的 R/RFR 选项，帧窗口中则显示出该物体的云图，如图 11-72 所示。

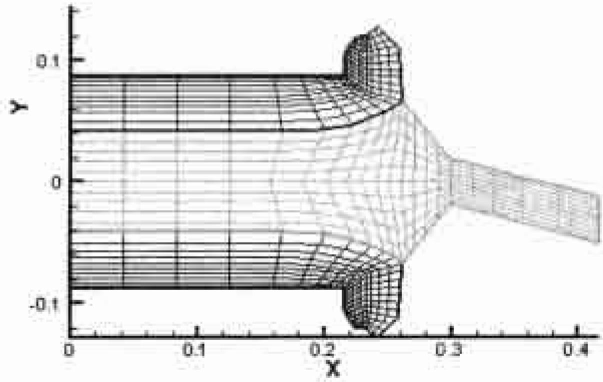


图 11-70　nozzle 的网格



图 11-71　Contour Details 对话框

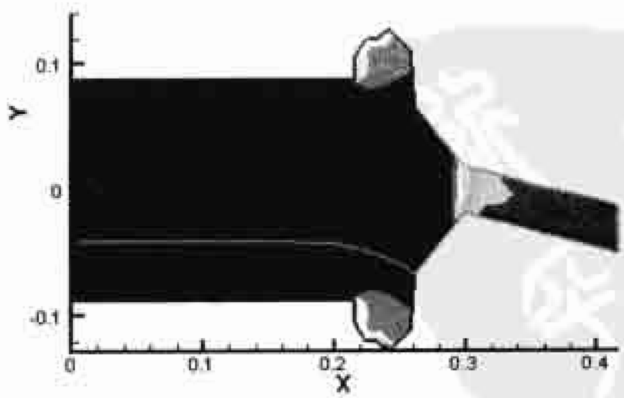


图 11-72　云图显示

图 11-72 的云图没有标尺，不方便区分各颜色区域值的大小，用户可单击 Contour Details 对话框中的 More>>按钮，使对话框展开，选择其中的 Legend 选项卡，并选中 Show Contour legend 复选框，如图 11-73 所示。此时，帧窗口中的云图已包含了标尺，可方便用户读数，如图 11-74 所示。

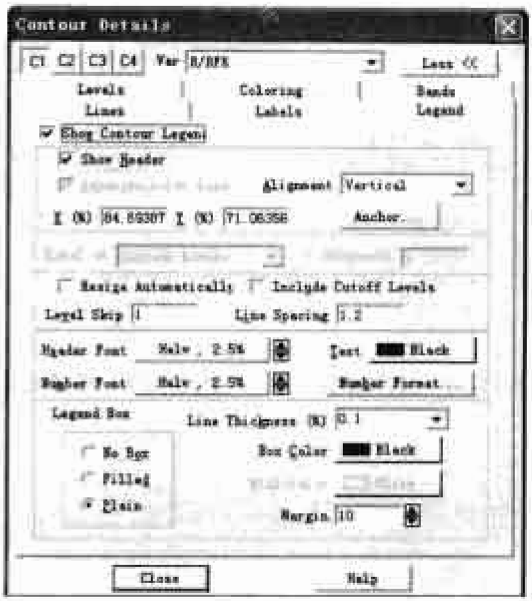


图 11-73 Contour Details 对话框中的标尺设置

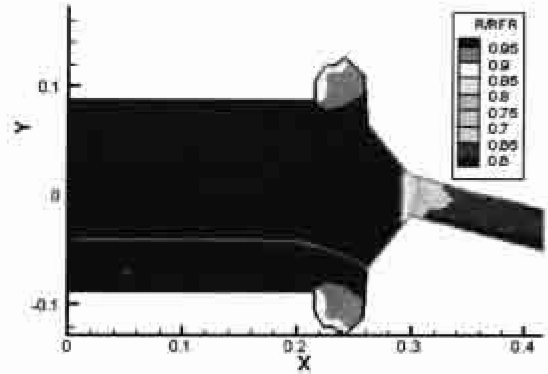


图 11-74 带标尺的云图

2. 等值线图及数据标注

等值线图是在云图之上建立的。单击工具栏中的 Zone Style 按钮，弹出如图 11-75 所示的 Zone Style 对话框，单击其中的 Contour Type 按钮，会弹出一个下拉列表，列表中包含 Lines、Flood、Both Lines & Flood、Average Cell Flood 和 Primary Value Flood 5 个选项，这里选择 Lines 选项，即可显示等值线图，如图 11-76 所示。

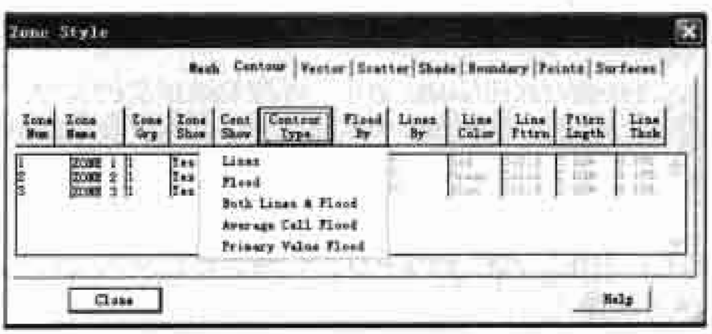


图 11-75 Zone Style 对话框

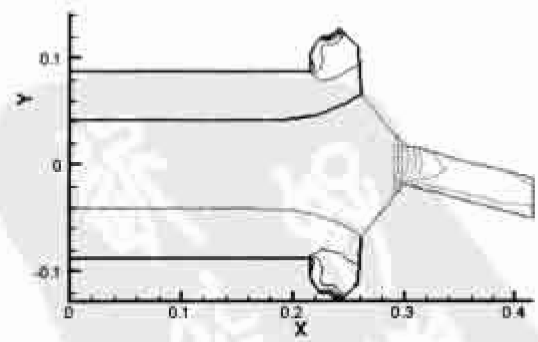


图 11-76 等值线图

在 Zone Style 对话框中，还可以设置等值线的线型、颜色和宽度等参数。

- 单击 Line Color 按钮，弹出如图 11-77 所示的对话框，可在其中选择等值线颜色。
- 单击 Line Pttrn 按钮，弹出如图 11-78 所示的下拉列表，可从中选择实线、D 虚线、点划线、点线、长虚线和点划点线等类型。
- 单击 Line Thck 按钮，弹出如图 11-79 所示的下拉列表，其中包含 0.02、0.1、0.4、0.8 和 1.5 等线宽。

此时，选择 Contour Details 对话框中的 Labels 选项卡，选中 Show Labels 复选框，则可以得到加注数据后的等值线图，如图 11-80 所示。

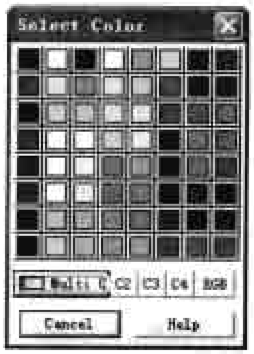


图 11-77　颜色设置

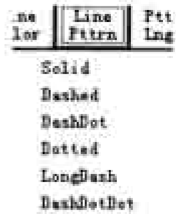


图 11-78　线型设置



图 11-79　线宽设置

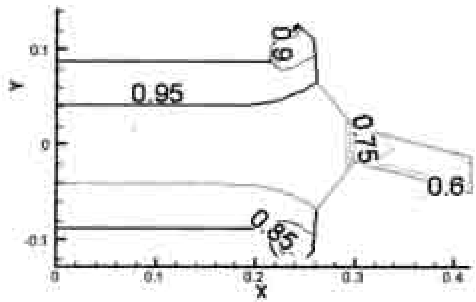


图 11-80　加注数据后的等值线图

3. 速度矢量图及迹线图显示

选择 File→Load Data file(s)命令，调入 Tecplot 安装目录下的“Demo\2D\velocity.plt”。取消选中工具栏中的 Mesh 复选框，选中 Vector 复选框，此时会弹出如图 11-81 所示的 Select Variables 对话框，保持默认设置，单击 OK 按钮。

此时，帧窗口中的速度矢量图默认的颜色为红色，如图 11-82 所示，不能反映速度的大小，所以单击工具栏上的 Zone Style 按钮，并在 Zone Style 对话框中单击 Line Color 按钮，然后在弹出的颜色选择对话框中选择多色（Multi）。这时的速度矢量图如图 11-83 所示，用户可以清晰地辨别各点速度的大小。

流动迹线是在速度矢量图的基础上绘制的。单击工具栏上的 按钮，然后在速度矢量图上上下拖动鼠标，便可绘制出如图 11-84 所示的迹线图。

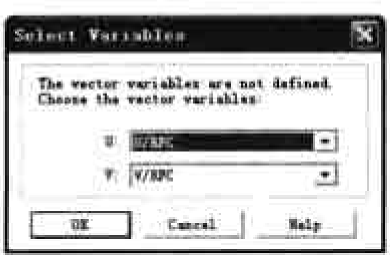


图 11-81　Select Variables 对话框

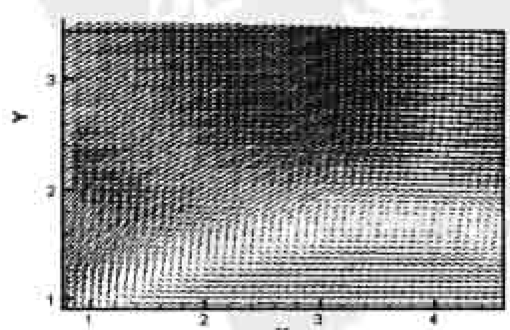


图 11-82　默认颜色的速度矢量图

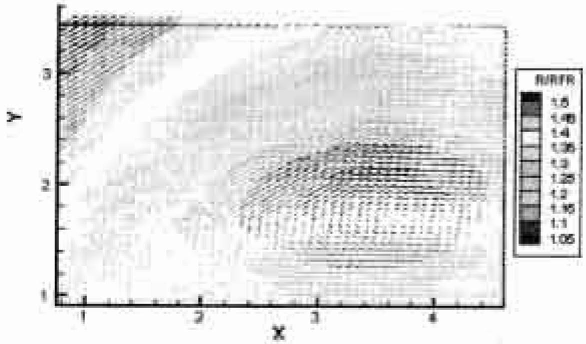


图 11-83　着色后的速度矢量图

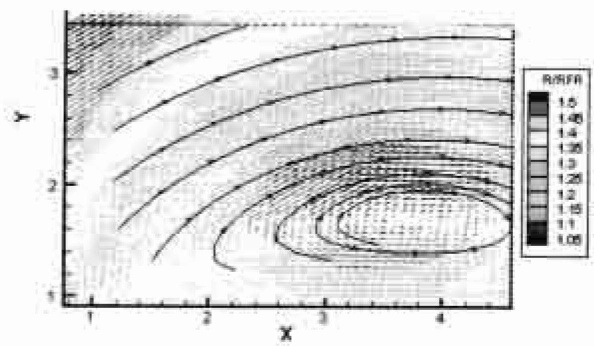


图 11-84　迹线图

4. XY 曲线图显示

选择 File→Load Data file(s)命令，调入 Tecplot 安装目录下的“Demo\XY\log2.plt”。在工具栏的帧模式中选择 XY Line，其 Map Layers 格式有直线式、符号式和柱状式等，如图 11-85 所示。此时帧窗口中的 XY 曲线如图 11-86 所示，只有一根曲线。

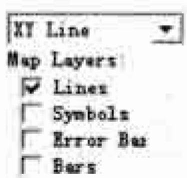


图 11-85　XY Line 帧模式

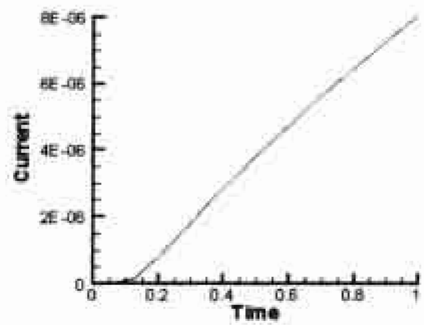


图 11-86　XY 曲线

单击工具栏中的 Mapping Style 按钮，弹出如图 11-87 所示的对话框，单击 Map Show 按钮，选择下拉列表中的 Activate 选项，以激活 Cur 和 Cur 2 曲线，如图 11-88 所示。

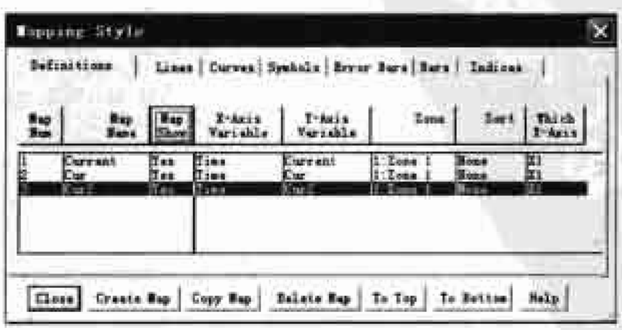


图 11-87　Mapping Style 对话框

选中 Map Layers 中的 Symbols 复选框，在 Mapping Style 对话框中选择 Symbols 选项卡，然后在 Symb Shape 的下拉列表中选择不同曲线点符号的样式，选择 Current 曲线点样式为 Square，Cur 曲线点样式为 Delta，Cur 2 曲线点样式为 Circle，曲线图即变成如图 11-89 所示的形式，可方便用户进行分析。

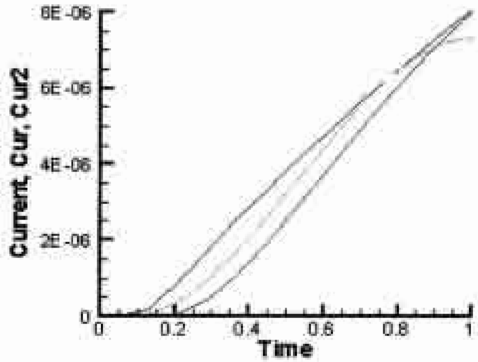


图 11-88　3 根 XY 曲线

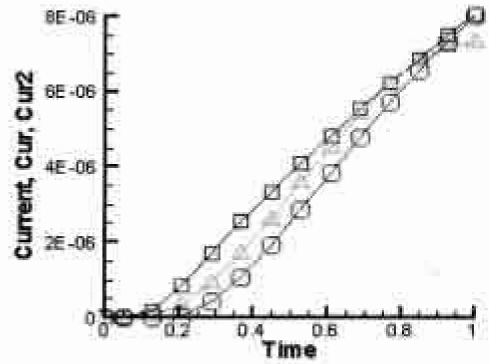


图 11-89　带有点样式的曲线图

5. 三维流场图显示

三维问题的云图、等值线图、矢量图的处理方法与二维一样。针对三维数据，Tecplot 还有特殊的绘图格式——围墙图，其形状类似于用围墙将平面分割成许多小格子。

围墙面的数据可以是 IJ 有序数据，也可以是 I、J、K 平面和 IJK 数据。围墙面的特别之处在于要绘制出底面数据，然后绘制出垂直于底面的数据作为围墙，并把面分割成小格子。下面介绍围墙图的绘制。

选择 File→Load Data file(s)命令，调入 Tecplot 安装目录下的“Demo\3D_Volume\fluid.plt”。取消选中工具栏中的 Mesh 复选框，选中 Contour 复选框，在弹出的 Contour Details 对话框的 Var 下拉列表框中选择 E 选项，此时的云图如图 11-90 所示。

然后单击 Zone Style 按钮，在弹出的 Zone Style 对话框中选择 Surfaces 选项卡，并单击 Surfaces to Plot 按钮，在下拉列表中选择 I-J-K-planes 选项，此时可以看到只有 X 方向有了围墙面，如图 11-91 所示。

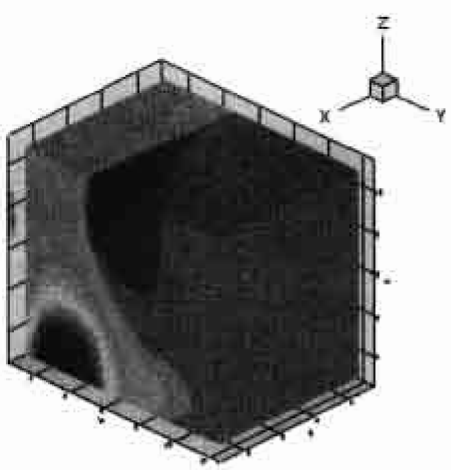


图 11-90　三维云图

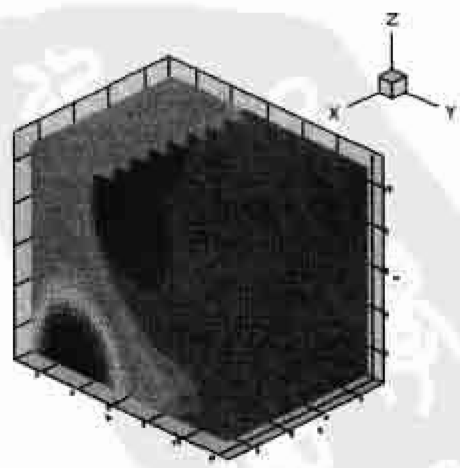


图 11-91　只有 X 方向的围墙面

接着需要调节围墙图的范围。在 Zone Style 对话框的 Surfaces 选项卡中，选择 Rang for I-Planes 栏，弹出如图 11-92 所示的 Enter Range 对话框，改变 Skip 为 5，单击 OK 按钮。同理，选择 Rang for J-Planes 栏，也将其 Skip 改为 5。选择 Rang for K-Planes 栏，将其 Skip 改为 Mx。

最后，单击工具栏中的 按钮，将图形调至合适视图，如图 11-93 所示。

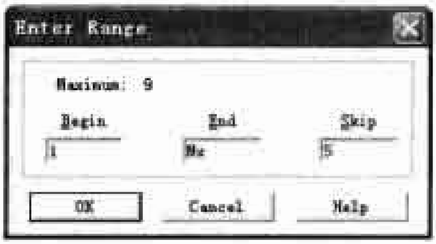


图 11-92　Enter Range 对话框

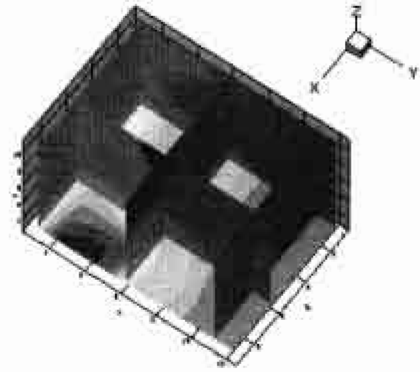


图 11-93　围墙图效果

11.4　实例・操作——单圆柱绕流的 Tecplot 后处理

本例介绍利用 Tecplot 软件对二维流动问题进行后处理的过程，旨在得到清晰直观的速度云图、等值线图和速度矢量图等。

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 END\Ch4\4-1.cas，4-1.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch11\11-4.avi 文件。

【操作步骤】

（1）双击桌面上的 Tecplot 图标，打开 Tecplot 软件。

（2）选择 File→Import 命令，选择 Select Import Format 对话框中的 FLUENT Data Loader 选项，单击 OK 按钮。在弹出的对话框中选中 Load Case and Data Files 单选按钮，然后单击 Case File 和 Data File 文本输入框右侧的“...”按钮，从硬盘上选择要加载的文件 4-1.cas 和 4-1.dat，单击 OK 按钮。此时，网格已显示在视图窗口中，如图 11-94 所示。

（3）取消选中工具栏中的 Mesh 复选框，选中 Contour 复选框。此时自动弹出如图 11-95 所示的 Contour Details 对话框，视图窗口中呈现出该物体的压强云图，如图 11-96 所示。

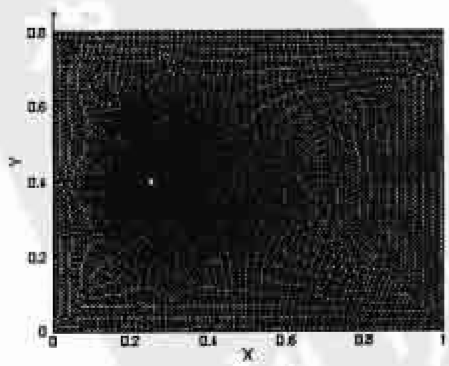


图 11-94　第 4 讲中实例・模仿的网格

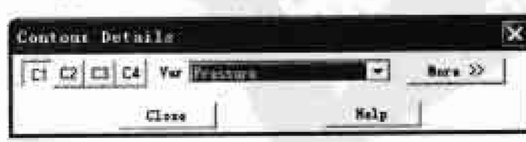


图 11-95　Contour Details 对话框

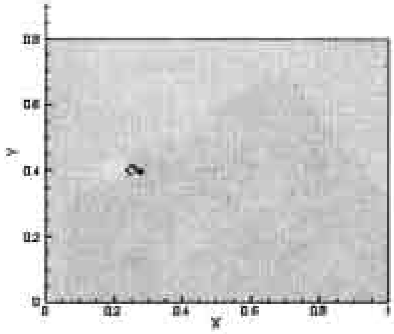


图 11-96　压强云图

（4）单击 Contour Details 对话框右侧的 More>>按钮，对话框展开如图 11-97 所示，选择其中的 Legend 选项卡，选中 Show Contour Legend 复选框，此时视图窗口中的压强云图出现了标尺，如图 11-98 所示。

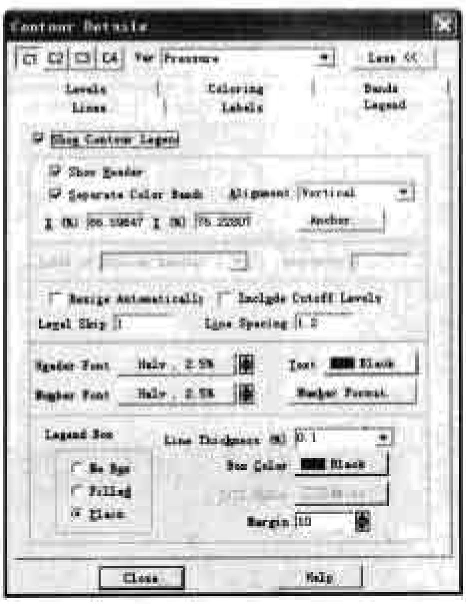


图 11-97　展开后的 Contour Details 对话框

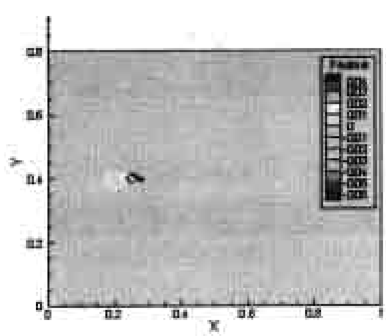


图 11-98　有标尺的压强云图

（5）此时利用对话框中 Header Font 和 Number Font 右侧的上下箭头调整标尺数据的尺寸，其中 Header Font 用于调整标尺对象的名称，Number Font 用于调整标尺数字。Legend Box 栏用于设置标尺的背景框，可以选择无框（No Box）、填充（Filled）或有框透视（Plain）3 种。若此时将 Header Font、Number Font 和 Legend Box 按如图 11-99 所示进行设置，则标尺变为如图 11-100 所示的形式。

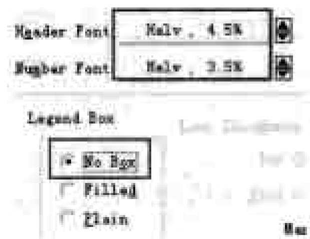


图 11-99　对标尺进一步设置

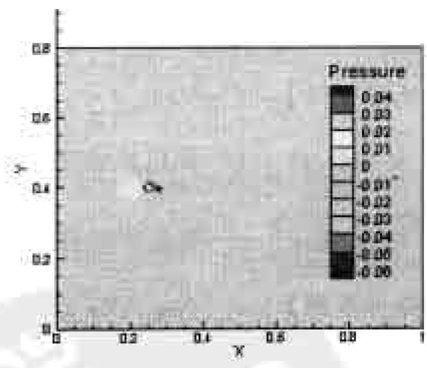


图 11-100　无框透视标尺

（6）将 Var 下拉列表框中的 Pressure 换为 X Velocity，可得到 X 方向的速度云图，如图 11-101 所示。

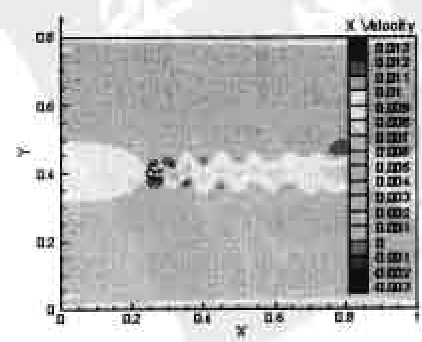


图 11-101　X 向的速度云图

（7）单击工具栏中的 Zone Style 按钮，弹出 Zone Style 对话框，如图 11-102 所示，在对话框的 Contour 选项卡中选择 Zone Name 为 fluid，然后单击 Contour Type 按钮，在弹出的下拉列表中选择 Lines 选项。此时，视图窗口中的速度云图变为了速度等值线图，如图 11-103 所示。但等值线的颜色均为红色，不能区分速度的大小。因此，单击 Zone Style 对话框 Contour 选项卡中的 Line Color 按钮，弹出 Select Color 对话框，如图 11-104 所示，选择左下角的 Multi C1。此时不同速度大小的等值线已被不同颜色所标识，如图 11-105 所示。

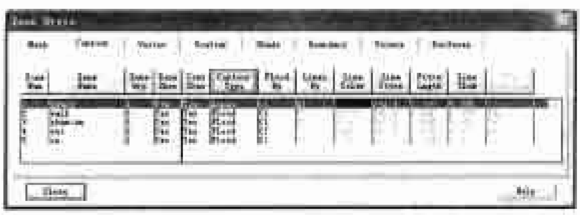


图 11-102　Zone Style 对话框

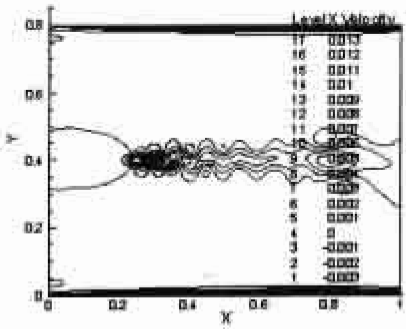


图 11-103　红色的速度等值线图

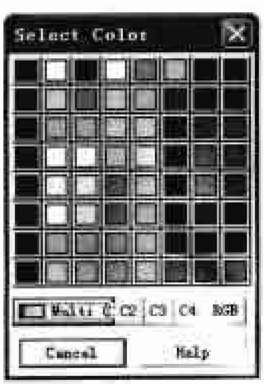


图 11-104　Select Color 对话框

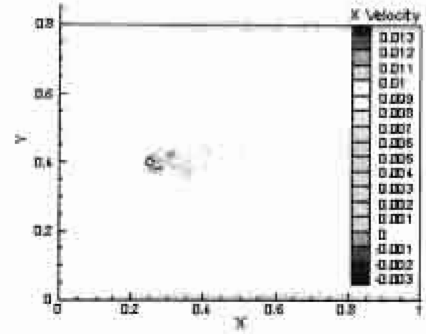


图 11-105　速度等值线图

（8）回到 Contour Details 对话框，选择 Legend 选项卡，取消选中 Show Contour Legend 复选框。然后选择 Labels 选项卡，选中 Show Labels 复选框，此时的速度等值线图出现了数据标注，如图 11-106 所示。

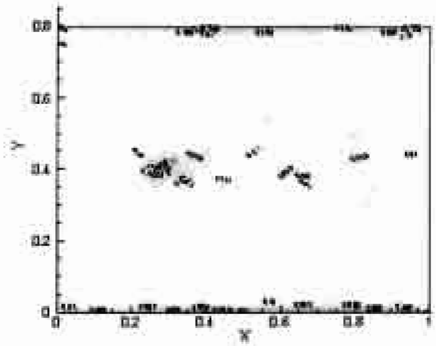


图 11-106　数据标注的速度等值线图

（9）若觉得标注的数据不够清晰，可利用 Labels 选项卡中 Font 右侧的上下箭头调整标注数字的大小，用 Level Skip 调整数据标注的密度。调整后的速度等值线图如图 11-107 所示。

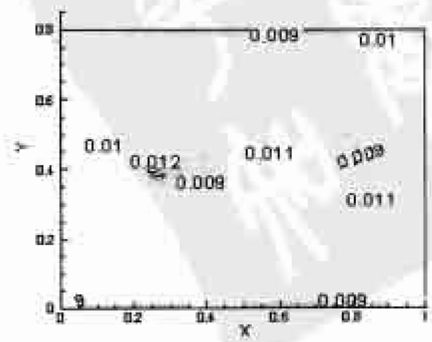


图 11-107　调整数据标注后的速度等值线图

（10）取消选中工具栏中的 Contour 复选框，选中 Vector 复选框，此时视图窗口中呈现出该物体的速度矢量图，如图 11-108 所示。同样，默认的颜色为红色，单击工具栏中的 Zone Style 按钮，弹出 Zone Style 对话框，单击 Vector 选项卡中的 Line Color 按钮，弹出 Select Color 对话框，选择其中的 Multi C2，即可得到有颜色的速度矢量图，如图 11-109 所示。

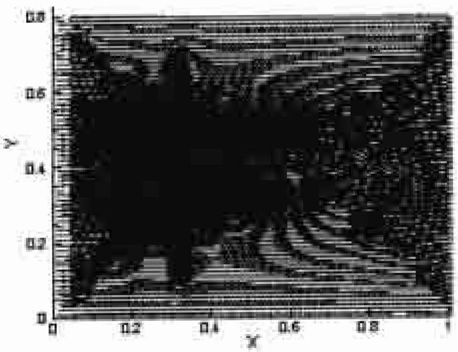


图 11-108　红色的速度矢量图

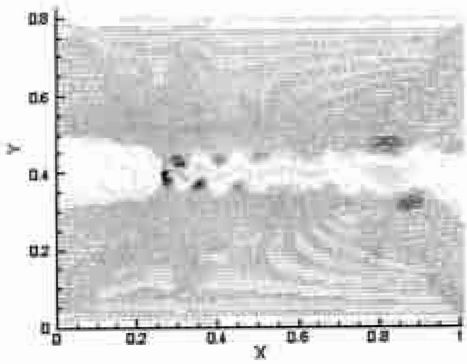


图 11-109　有颜色的速度矢量图

（11）利用鼠标中键放大视图并用鼠标右键拖拉视图，将圆柱前后的速度矢量图放大。然后单击工具栏中的按钮，在速度矢量图上合适的位置单击几次，即可生成流动的迹线图（每单击一次生成一条），如图 11-110 所示。

（12）在图形后处理的过程中，需要及时地将处理好的图片保存到硬盘上。选择 File→Export 命令，弹出如图 11-111 所示的 Export 对话框。输出形式有 AVI、BMP、EPS、JPEG、TIFF 等视频或图像格式，用户可根据实际需要选择。选中右侧的 Color 复选框可输出彩色图像，若取消选中，则输出的为黑白图像。

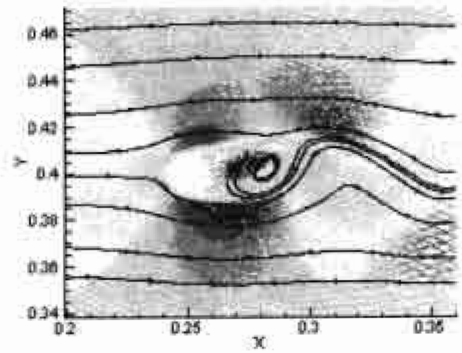


图 11-110　流动迹线图

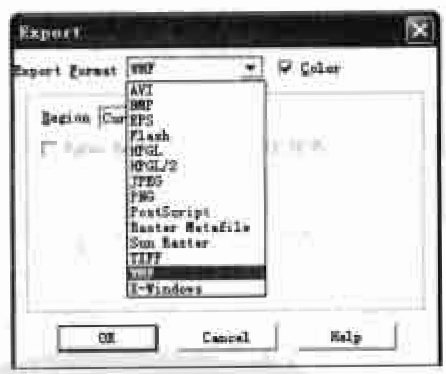


图 11-111　Export 对话框

（13）选择其中一种格式后，Export 对话框即出现相应的设置选项，如选择 TIFF，此时的 Export 对话框如图 11-112 所示，可以用其默认的图形大小（Use Width Of Image on Screen），或自己输入图形大小（在 Enter Width 数据输入框中输入相应的宽度）。图形像素调整好后，单击 OK 按钮。

（14）此时，会弹出如图 11-113 所示的 Select Export File 对话框，用户可在“文件名”文本输入框中输入便于区分的名字，单击“保存”按钮即可。

（15）保存完处理好的云图、等值线图和矢量图后，选择 File→Exit 命令，弹出如

图 11-114 所示的询问对话框，单击“是”按钮，安全退出 Tecplot。



图 11-112 TIFF 输出选项

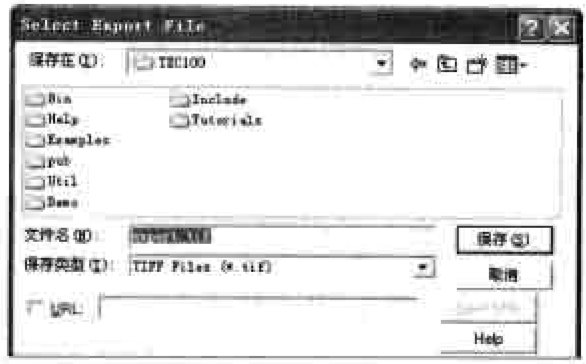


图 11-113 Select Export File 对话框



图 11-114 询问对话框

11.5 实例·练习——混合器内部流动的 Tecplot 后处理

本例介绍利用 Tecplot 软件针对三维流动问题的后处理过程，帮助读者认识三维流动问题后处理与二维流动问题的不同之处。

【光盘文件】

起始文件——参见附带光盘中的 END\Ch5\5-5.cas，5-5.dat 文件。

动画演示——参见附带光盘中的 AVI\Ch11\11-5.avi 文件。

【操作步骤】

（1）双击桌面上的 Tecplot 图标，打开 Tecplot 软件。

（2）选择 File→Import 命令，选择 Select Import Format 对话框中的 FLUENT Data Loader 选项，单击 OK 按钮。在弹出的对话框中选中 Load Case and Data Files 单选按钮，然后单击 Case File 和 Data File 文本输入框右侧的“...”按钮，从硬盘上选择文件 5-5.cas 和 5-5.dat，单击 OK 按钮，加载后的网格如图 11-115 所示。

（3）取消选中工具栏中的 Mesh 复选框，选中 Contour 复选框，弹出 Contour Details 对话框，选择 Var 下拉列表框中的 Pressure，得到如图 11-116 所示的压强云图。

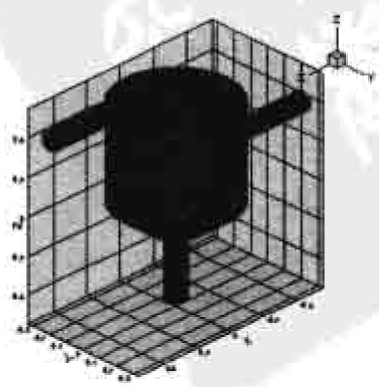


图 11-115 第 5 讲中实例·模仿的网格

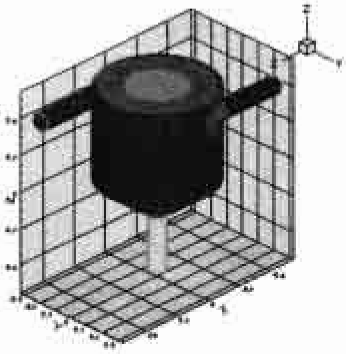


图 11-116　压强云图

（4）单击 Contour Details 对话框中的 More>>按钮，然后选择 Legend 选项卡，选中 Show Contour Legend 复选框，并利用 Header Font 和 Number Font 右侧的上下箭头，将它们的 Helv 均调整至 3.5%，且在 Legend Box 栏中选中 Filled 单选按钮。此时视图窗口中的压强云图如图 11-117 所示。

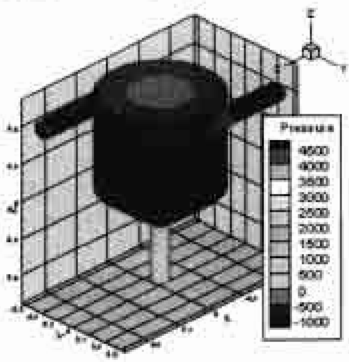


图 11-117　有标尺的压强云图

（5）依次选择 Var 下拉列表框中的 X Velocity 和 Y Velocity 选项，可分别得到 *X* 和 *Y* 方向的速度云图，如图 11-118 和图 11-119 所示。若将 Var 下拉列表框中的选项改为 Temperature，可得到温度云图，如图 11-120 所示。

（6）仍将 Var 下拉列表框中的选项改为 X Velocity，单击工具栏中的 Zone Style 按钮，弹出 Zone Style 对话框，选择 Zone Name 下方的 wall 选项，随后单击 Zone Show 按钮，在弹出的下拉列表中选择 Deactivate 选项。按照同样的方式关闭 out、in-cold 和 in-hot 的显示。接着选择 Zone Name 下的 fluid 选项，单击 Contour Type 按钮，在弹出的下拉列表中选择 Lines 选项，并单击 Line Color 按钮，在弹出的 Select Color 对话框中选择 Multi C1。然后回到 Contour Details 对话框，选择 Labels 选项卡，选中 Show Labels 复选框，并利用 Font 右侧的上下箭头将数字大小调整为 4.5%，可得如图 11-121 所示的速度等值线图。

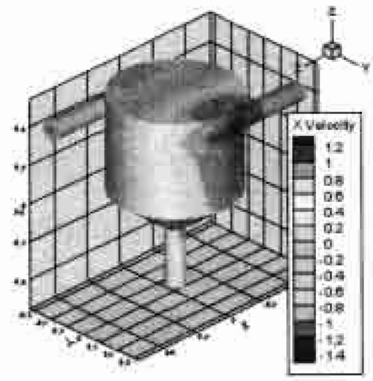


图 11-118　*X* 向速度云图

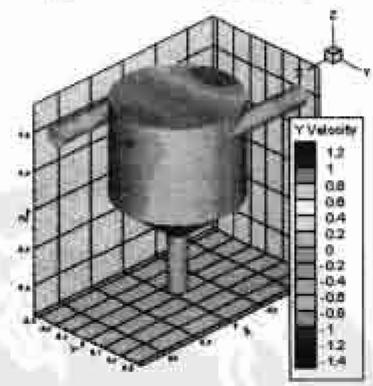


图 11-119　*Y* 向速度云图

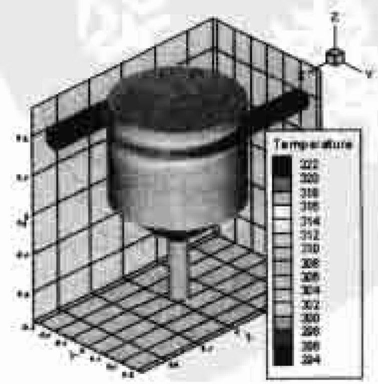


图 11-120　温度云图

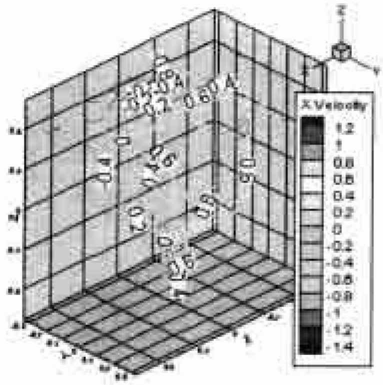


图 11-121　X 向速度等值线图

（7）取消选中工具栏中的 Contour 复选框，选中 Vector 复选框，此时视图窗口中呈现出该物体的速度矢量图，其默认的颜色为红色，单击工具栏中的 Zone Style 按钮，弹出如图 11-122 所示的 Zone Style 对话框，然后单击 Line Color 按钮，弹出 Select Color 对话框，选择其中的 Multi C1，得到如图 11-123 所示的速度矢量图。

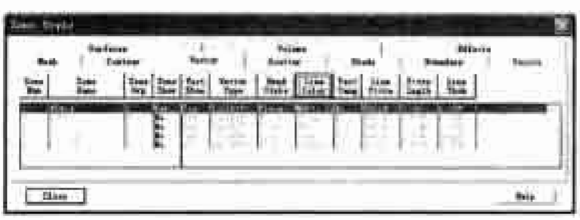


图 11-122　Zone Style 对话框

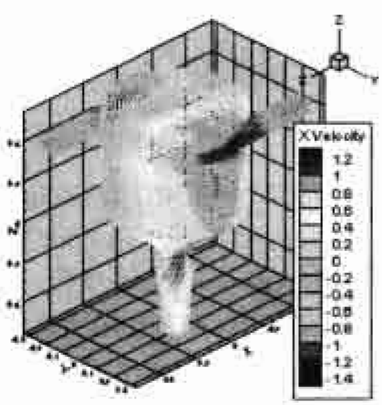


图 11-123　速度矢量图

（8）虽然已经处理得到了三维的云图、等值线图及矢量图，但有时更应关注容器内部某些截面上的分布情况。因此需要到 FLUENT 中将这些截面上的数据输出为 Tecplot 格式。启用 FLUENT 3D 解算器，选择 File→Export→Solution Data 命令，弹出如图 11-124 所示的 Export 对话框，在 File Type 下拉列表框中选择 Tecplot 选项，在 Surfaces 列表框中选择 hh、zh 选项，在 Quantities 列表框中选择 Velocity Magnitude、Static Temperature 选项，单击 Write 按钮，输出文件 5-5_tec.dat。然后在 Tecplot 中选择 File→Load Data File(s)命令，在弹出的如图 11-125 所示的 Load Data File 对话框中选择刚输出的数据文件 5-5_tec.dat，单击“打开”按钮。此时自动弹出如图 11-126 所示的 Select Initial Plot 对话框，选择 Initial Plot 下拉列表框中的 3D Cartesian 选项，单击 OK 按钮。视图窗口显示了两个主要截面的网格，如图 11-127 所示。



图 11-124　Export 对话框



图 11-125　Load Data File 对话框



图 11-126　Select Initial Plot 对话框

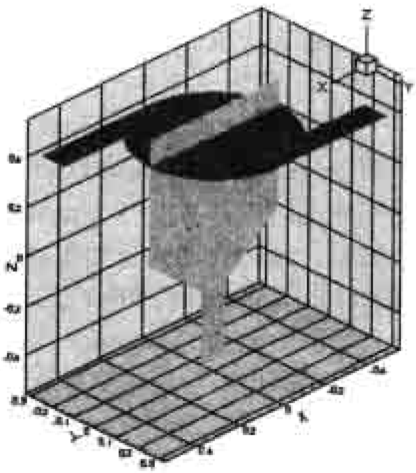


图 11-127　横纵两个截面的网格

（9）取消选中工具栏中的 Mesh 复选框，随后选中 Contour 复选框，弹出 Contour Details 对话框。因为只输出了速度和温度两个变量的数据，所以 Var 下拉列表框中只有 X、Y、Z（3 个方向的坐标）、velocity-magnitude 和 temperature，如图 11-128 所示。

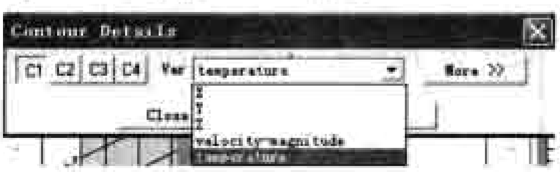


图 11-128　Contour Details 对话框

（10）选择 Var 下拉列表框中的 temperature 选项，并单击 Contour Details 对话框右侧的 More>>按钮，在展开的对话框中选择 Legend 选项卡，选中 Show Contour Legend 复选框。然后利用 Header Font 和 Number Font 右侧的上下箭头，将它们的 Helv 分别调整至 3.5%和 3.0%，且在 Legend Box 栏中选中 Filled 单选按钮，即可得到两个截面的温度云图，如图 11-129 所示。

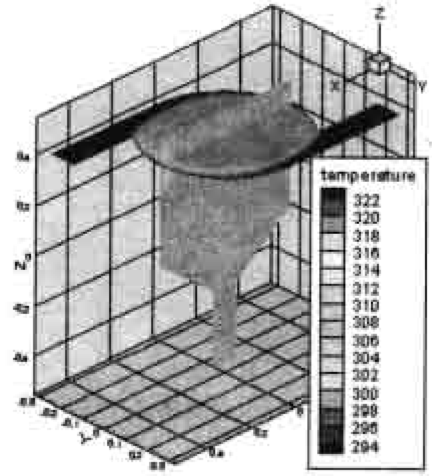


图 11-129　横纵两个截面的温度云图

（11）将 Var 下拉列表框中的选项改为 velocity-magnitude，得到如图 11-130 所示的速度云图。

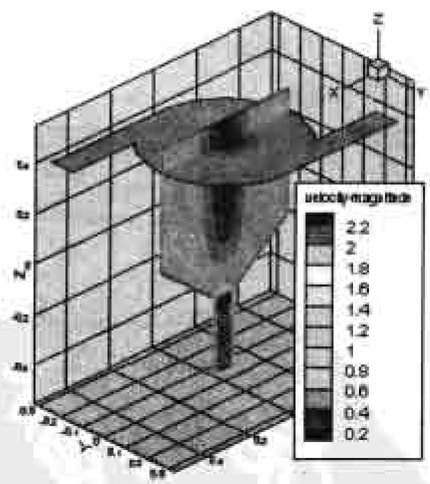


图 11-130　横纵两个截面的速度云图

（12）单击工具栏中的 Zone Style 按钮，弹出 Zone Style 对话框，选择 Zone Name 下的 zh 选项，单击 Contour Type 按钮，在弹出的下拉列表中选择 Lines 选项，并单击 Line Color 按钮，在弹出的 Select Color 对话框中选择 Multi C1。用同样的方法设置面 hh。然后回到 Contour Details 对话框，选择 Labels 选项卡，选中 Show Labels 复选框，并利用 Font 右侧的上下箭头将数字大小调整为 4.5%，可得到如图 11-131 所示的速度等值线图。

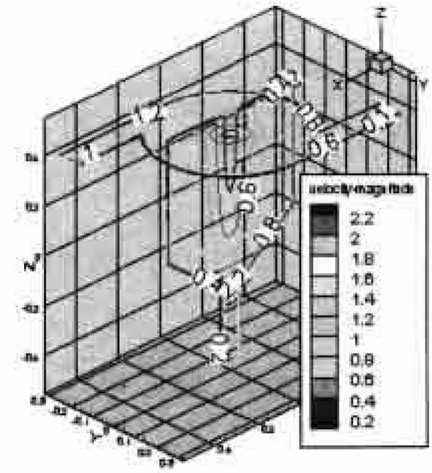


图 11-131　横纵两个截面的速度等值线图

（13）取消选中工具栏中的 Contour 复选框，选中 Vector 复选框，弹出如图 11-132 所示的 Select Variables 对话框，选择 U、V、W 下拉列表框中的参数均为 velocity-magnitude，单击 OK 按钮。

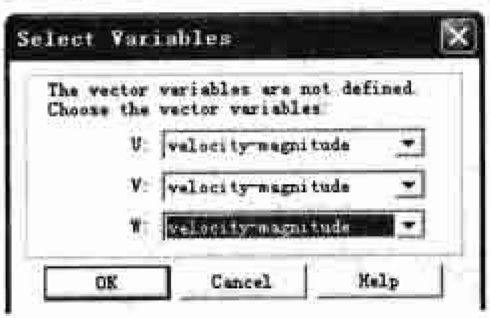


图 11-132　Select Variables 对话框

（14）单击工具栏中的 Zone Style 按钮，弹出 Zone Style 对话框，选择 Zone Name 下的 zh 选项，单击 Line Color 按钮，在弹出的 Select Color 对话框中选择 Multi C1。用同样的方法设置面 hh 的颜色，得到如图 11-133 所示的速度矢量图。

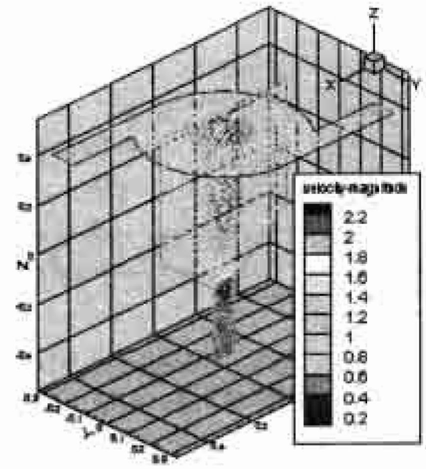


图 11-133　横纵两个截面的速度矢量图

（15）图形后处理的过程中，选择 File→Export 命令，在弹出的 Export 对话框中进行图片格式的设置后，可及时保存视图窗口中的图像。

（16）后处理结束后，选择 File→Exit 命令，弹出询问对话框，单击“是”按钮，安全退出 Tecplot。

参 考 文 献

1. 朱红钧，林元华，谢龙汉．FLUENT 流体分析及仿真实用教程．北京：人民邮电出版社，2010

2. 袁恩熙．工程流体力学．北京：石油工业出版社，2006

3. 毛根海，邵卫云，张燕．应用流体力学．北京：高等教育出版社，2006

4. 李人宪．有限体积法基础．北京：国防工业出版社，2008

5. 陶文铨．数值传热学（第2版）．西安：西安交通大学出版社，2001

6. 王福军．计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用．北京：清华大学出版社，2004

7. 韩占忠，王敬，兰小平．FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用．北京：北京理工大学出版社，2004

8. 王瑞金，张凯，王刚．FLUENT 技术基础与应用实例．北京：清华大学出版社，2007

9. 江帆，黄鹏．Fluent 高级应用与实例分析．北京：清华大学出版社，2008

10. 于勇，张俊明，姜连田．FLUENT 入门与进阶教程．北京：北京理工大学出版社，2008

11. 温正，石良辰，任毅如．FLUENT 流体计算应用教程．北京：清华大学出版社，2009

12. 朱红钧，陈小榆，王怡．海洋平台圆柱桩脚周围的局部流场模拟研究．第二十一届全国水动力学研讨会暨第八届全国水动力学学术会议暨两岸船舶与海洋工程水动力学研讨会论文集．北京：海洋出版社，2008：657~663

13. 朱红钧，于强，陈小榆．90° 输油圆弯管局部流场模拟研究．全国传热传质与节能技术研讨会（2008）论文集，66~68

14. 朱红钧，曹妙渝，陈小榆，曾涛．油水两相流管路流动的模拟研究．石油工业计算机应用，2008，15（4）：27~29

15. 朱红钧，袁清华，陈小榆，刘军．输油管道泄漏点处原油流动局部流场的模拟．内蒙古石油化工，2009，35（2）：10~12

16. 朱红钧，陈小榆，王雪．水下热油管道停输温降过程的数值模拟．特种油气藏，2009，16（2）：98~99

17. 朱红钧，林元华，杜仁德．空气钻水平井注入参数优化分析．天然气工业，2009，29（11）：56~58

18. 朱红钧，林元华，马成学．平坦地区含硫化氢集输管道的泄漏扩散模拟．西南石油大学学报（自然科学版），2009，31（6）：156~160

19. 朱红钧，林元华，田博，明传中，朱伟．气体钻井偏心环空气固两相流模拟研究．石油钻采工艺，2010，32（1）：22~25

20. 尹平，朱红钧．输气管路节流阀不同开度时的流场模拟．天然气技术，2009，2（2）：64~66

21. 尹平，朱红钧．天然气流经弯曲油管柱时的流场模拟．内蒙古石油化工，2009，35（14）：3~5